

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760358

研究課題名(和文) 津波被害予測のための詳細モデルによる超大規模流体 構造連成解析手法の構築

研究課題名(英文) The development of large-scale FSI analysis system for estimation of tsunami damage with high fidelity model

研究代表者

田中 聖三 (Tanaka, Seizo)

東京大学・地震研究所・特任助教

研究者番号：10439557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、津波が建物に及ぼす力を評価可能な流体-構造の連成解析手法を構築するものである。津波伝播解析を行うためにVOF法に基づく3次元自由表面流れ解析手法を構築した。また、亀裂進展を考慮した構造解析手法として、PDS-FEMに基づく解析手法を構築し、流体解析より圧力分布データを受け取り、それを外力として入力することが可能なシステムを構築した。また、津波襲来以前の地震動による建物の部材劣化を考慮するため、地震動による構造物の地震応答解析手法を構築した。以上、本研究で構築されたシステムは、大規模計算機システムでの運用を想定しており、実際に理化学研究所所有の京コンピュータ上で良好な性能を出している。

研究成果の概要(英文)：This study developed a numerical method for fluid-structure interaction problem due to tsunami wave impacts. The developed simulation method for tsunami propagation was based on VOF method for free surface moving boundary technique. And PDS-FEM based structure analysis method was developed for crack propagation of structure. And time history of wave force (pressure) data from tsunami propagation analysis method was implemented as external force of structure analysis to interact the wave force. Also, we developed solid-structure interaction analysis system to consider the deterioration of the structure from earthquake before tsunami coming. All systems developed in this study were carried out on K super parallel computer with good efficiency.

研究分野：計算力学

キーワード：流体 - 構造連成 大規模並列計算 破壊現象

1. 研究開始当初の背景

2011年に発生した東日本大震災において、地震発生後の津波襲来は未曾有の被害を出した。津波などの自然災害は実大実験による再現は不可能であり、数値シミュレーションによる被害評価・予測システムの開発が必要である。特に地震動による構造物に発生した亀裂などにより、構造物の剛性が低下し、その後、津波が来襲した場合、構造物は規定の耐力を有さない。このような複合災害では、それぞれを正確に再現・予測しなければならず、現象によっては同時に評価する必要がある。しかし、これらの現象を正確に再現するためには、建物や地形などを詳細にモデル化する必要がある、それらの超大規模シミュレーションを高速・高効率に実行できる解析システムが必要である。近年のスーパーコンピュータの発展は、システムの増大化により実現しており、これらをより効率的に利用することが可能なシステムが必要とされていた。また、膨大な入出力データのハンドリングにおいても効率化を施さなければならない。

2. 研究の目的

上記のような背景において、詳細なシミュレーションには構造物の幾何形状を精緻に表現した詳細なモデルが必要であり、そのシミュレーションは超大規模なものとなる。特に構造物の被害予測・評価においては、構造物の破壊過程を理解する必要があり、亀裂進展を表現するためには、高解像度の解析メッシュが必要となる。また、この構造物に作用する津波波力を正確に算定する必要があり、構造物周辺でも複雑な流況を把握するための高解像度メッシュが必要となる。そのため、計算コスト(計算機容量、計算時間)は多大なものとなり、この大規模問題を解くために超大規模システムにおいても高効率な並列計算手法が必要となる。

そこで、本研究では上記の要求に応える津波現象を正確に表現し津波波力を正確に算定することができる詳細なモデルの作成、およびそれを用いた複雑な自由表面形状と局所的な流況を把握することのできる流体解析手法と破壊挙動を解析することが可能な構造解析手法を接続させた、津波による構造物の被害評価システムの構築を行った。さらに津波襲来前の地震動による構造物の耐力の低下を考慮するために、建物の地震動解析システムの構築を行った。

3. 研究の方法

(1) はじめに、津波の伝播を評価できる自由表面流れ解析手法の構築化を行った。時々刻々と変化する自由表面の表現方法としては、VOF(volume of fluid)法に基づく界面捕捉法を用いた方法とした。選択理由としては、当手法が巻き込みや砕波等を比較的容易に表現可能であること、またアルゴリズム的に

領域分割に基づく並列計算手法でのロードバランスの均一化が図り易いことである。作成されたプログラムの妥当性を検討するために、港湾空港技術研究所で実施されたコンクリート版破壊実験の実験結果と比較を行った。

また、構造物の破壊解析を行うために、PDS-FEM(particle discretization scheme, finite element method)に基づく解析手法の整備を行った。PDS-FEMは変位場に不連続な関数を用い、破壊面では剛性を低下させることにより亀裂進展を表現できる方法である。このプログラムに津波伝播解析の結果である圧力時刻歴を入力として、津波波力による破壊解析を行うことを可能とした。コンクリート版破壊解析を行い、亀裂が進展していく様子を捉えることが可能であると確認した。

(2) さらに、地震動による構造物の被害(亀裂進展)評価を効率的に行うために GAMERA Framework に基づく構造物の地震動応答解析手法を構築した。超高詳細モデルを用いた建物の地震動応答解析を京コンピュータ上でを行い、並列化性能評価を行った。

4. 研究成果

(1) 津波伝播解析手法を港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路で行われたコンクリート版の破壊実験の再現に適用する。大規模水路は図-1に示すように、全長182m、幅3.5m、深さ12mであり、途中2段の斜面を有する。この水路に対し、津波解析を行うために作成した有限要素メッシュを図-2に示す。メッシュサイズとして、水面近傍は20cm最小節点間隔10cmであり、総節点数は約250万節点となっている。津波はモデル図-1の左側にある造波版の動きを模擬するように境界壁面を移動させることにより造波される。入力波高は2.5mである。境界壁面ではslip条件を課している。解析結果として、図-3に各時刻の水面形状を示す。3次元解析であるが、水面位置のみを表示させている。これらの図より、波が造波され、沖から伝播し、コンクリート版に衝突している様子が解

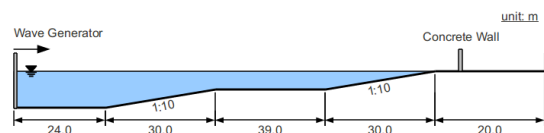


図-1 波動水路モデル

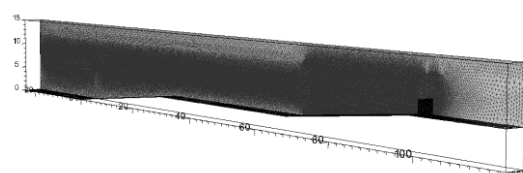


図-2 流体領域の有限要素メッシュ

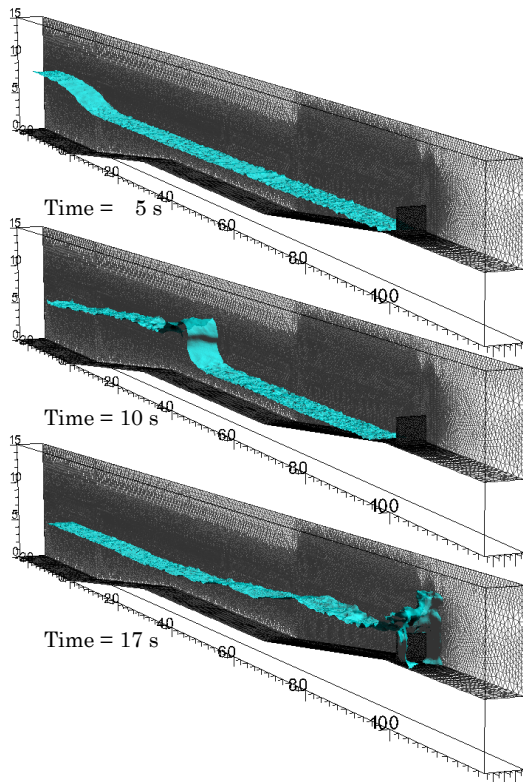


図-3 各時刻の水面形状

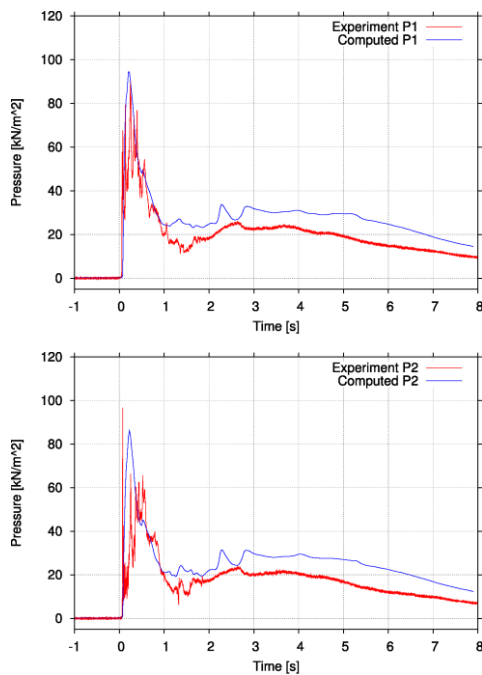


図-4 P1,P2 での圧力時刻歴

る。また、コンクリート版前面に計測点 P1、P2 での圧力の時刻歴を図-4 に示す。圧力計測点位置は図-5 に示す。この図より、衝撃波圧は実験値と良く一致している。重複波圧に関しては計算結果と実験結果に差が表れているが、解析モデルでは水路終端を単純に壁面と取り扱っているなど、実験との差異があるためであると考えられる。

先の津波解析で得られたコンクリート版前面における時々刻々の圧力分布は、構造解

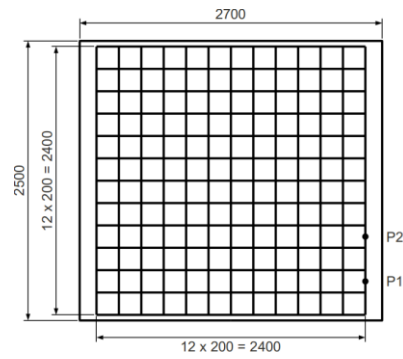


図-5 コンクリート版諸元

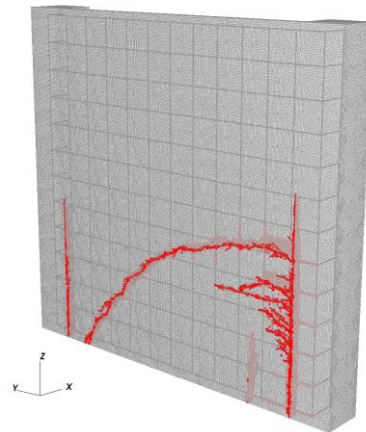


図-6 亀裂進展図

析プログラムに渡され、それを外力として入力し、コンクリート版の動的破壊解析を行った。これにより、一方向の弱連成解析となる。コンクリート版の諸元を図-5 に示す。なお、コンクリートの圧縮強度は 18 N/mm^2 、鉄筋は D6 の単鉄筋であり、コンクリート版の厚さは 6 cm である。これらの材料は線形弾性体として解析を行った。メッシュサイズは鉄筋周辺で 2 mm 、コンクリート版表面で 20 mm の分割となっており、総節点数 250 万、総要素数 1500 万である。解析結果として、最終的な亀裂パターンを図-6 に示す。図中の赤線は亀裂面を示す。この図より、津波外力によりコンクリート版に亀裂が発生している様子が見てとれる。また、津波力により円形状の穴を形成するような亀裂進展発生していることが解る。亀裂が右側に偏っているのは、津波波圧が非対称であるためである。入力波についての検討が今後必要となる。このプログラムは OpenMP/MPI のハイブリッド並列計算に対応しており、解析は京コンピュータで実行されている。

(2) さらに構造物の地震動による建物応答解析手法の構築を行い、建屋の地震応答解析を行った。解析手法としては、GAMERA Framework に含まれるマルチグリッド法、精度混合演算に基づく前処理法を導入し、非常に高効率、高速に解析進めることが可能となった。解析モデルは、図-7 に示すような地盤と建屋を結合させた地盤-構造連成モデルを作成した。モデルは、2 次四面体要素により

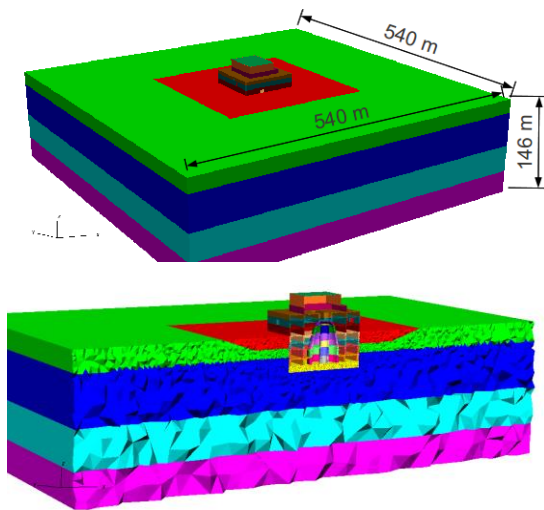


図-7 解析モデル(上:全体図, 下:断面図)

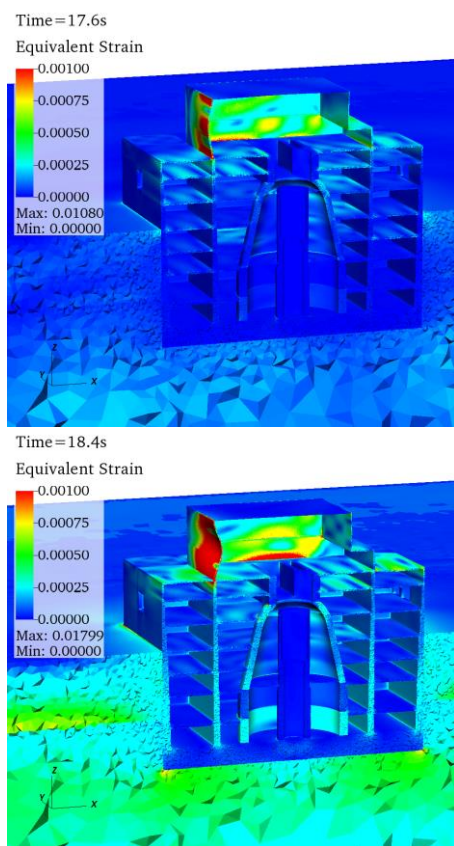


図-8 各時刻における変形図
および相当歪み分布

分割され、総自由度は約1億自由度となっている。最少要素サイズは、建屋近傍で0.5mである。地盤の要素サイズは10Hzの地震波長を10分割するように設定している。入力地震波としては、2007年新潟県中越沖地震波を用いた。計算結果として、図-8に各時刻の変形図および相当歪み分布を示す。この図より高詳細モデルにより時々刻々のひずみ分布の変化が捉えられていることが解る。また、並列計算性能評価として、京コンピュータにおける演算速度倍率を図-9に示す。この図より、1億自由度問題を高効率に実行できてい

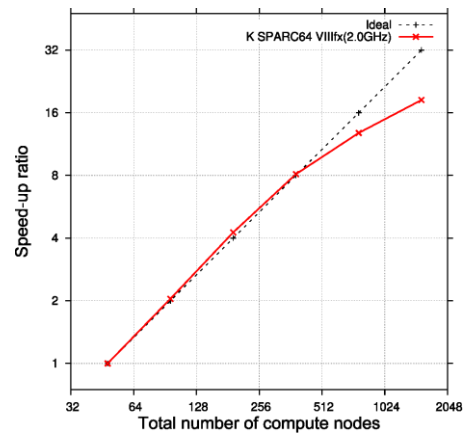


図-9 並列化性能評価

ることが解る。本解析手法により、高効率に地震応答解析を進めることができる。本研究により、地震・津波による建造物の被害評価が可能なシステムが完成されている。今後はより解析の相互を効率的・統合的に行うことができるシステムの整備を進める必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. 田中聖三, 市村強, 堀宗朗, M. L. L. Wijerathne, 高詳細モデルを用いた大規模地盤-複雑構造物の地震応答解析手法の開発, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 70, pp. 613-620, 2014. (査読有)
2. 田中聖三, 古宇田剛史, 堀宗朗, 孫方涛, ソリッド要素有限要素法を用いた RC 構造部材の弾塑性破壊解析の可能性, コンクリート工学論文集, Vol. 25, pp. 191-199, 2014. (査読有)
3. 田中聖三, F. Sun, 堀宗朗, 市村強, M. L. L. Wijerathne, 動的津波荷重による建造物の破壊解析の基礎的研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, I_903~I_908, 2013. (査読有)

[学会発表] (計 13 件)

1. S. Tanaka, T. Ichimura, M. Hori and M. L. L. Wijerathne, Large-scale seismic response analysis of structure using solid finite element method, 5th Asisa Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM) & 4th International Symposium on Computational Mechanics, 2014 年 12 月 11 日-14 日, Singapore(Singapore).
2. 田中聖三, 市村強, 堀宗朗, M. L. L.

- Wijerathne, ソリッド有限要素法による大規模地震動応答解析, 第 19 回計算工学講演会, 2014 年 6 月 11 日-13 日, 広島国際会議場(広島県広島市).
3. S. Tanaka, T. Ichimura, M. Hori and M.L.L. Wijerathne, Seismic response analysis for estimation of structural damage, 1st International Conference on Computational Engineering and Science and Environmental Problems (COMPSAFE), 2014 年 4 月 13 日-16 日, 仙台国際センター(宮城県仙台市).
 4. S. Tanaka, F. Sun, M. Hori, T. Ichimura and M.L.L. Wijerathne, Development of a failure analysis system of RC structures subjected to dynamic wave impacts, 12th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), 2013 年 7 月 22 日-25 日, Raleigh (U.S.A.)
 5. 田中聖三, 孫方涛, 堀宗朗, 市村強, M.L.L. Wijerathne, 動的津波荷重による構造物の破壊解析, 第 18 回計算工学講演会, 2013 年 6 月 19 日-21 日, 東京大学生産技術研究所(東京都目黒区).
 6. 田中聖三, 孫方涛, 堀宗朗, 市村強, M.L.L. Wijerathne, 波力による RC 構造物の大規模破壊解析, 第 62 回理論応用力学講演会, 2013 年 3 月 6 日-8 日, 東京工業大学(東京都目黒区).
 7. S. Tanaka, F. Sun, M. Hori, T. Ichimura and M.L.L. Wijerathne, Development of failure analysis method of structure due to tsunami impact, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering (10CUEE), 2013 年 3 月 1 日-2 日, 東京工業大学(東京都目黒区).
 8. M. Hori, S. Tanaka, F. Sun, T. Kouta, T. Ichimura, M.L.L. Wijerathne, Study on failure analysis of reinforced concrete structure using large scale finite element method of solid element, International Congress on Computational Mechanics and Simulation, 2012 年 12 月 10 日-12 日, Hyderabad (India).
 9. 田中聖三, F. Sun, 堀宗朗, 市村強, M.L.L. Wijerathne, 津波力による構造物の破壊解析の基礎的研究, 第 32 回土木学会地震工学研究発表会, 2012 年 10 月 25 日-27 日, 東京大学生産技術研究所(東京都目黒区).
 10. S. Tanaka, F. Sun, M. Hori, T. Ichimura and M.L.L. Wijerathne, Large-scale failure analysis of reinforced concrete structure by tsunami wave force, 15th World Conference in Earthquake Engineering (15WCEE), 2012 年 9 月 24 日-28 日, Lisbon (Portugal).
 11. S. Tanaka, F. Sun, M. Hori, T. Ichimura, M.L.L. Wijerathne, The failure analysis of structure due to tsunami impacts, Information & Computation in Civil & Environmental Engineering, 2012 年 9 月 19 日-20 日, ホテル千年松(愛媛県今治市).
 12. S. Tanaka, M. Hori, T. Ichimura, M.L.L. Wijerathne, T. Miyamura, L. Chen, Large-scale simulation of the failure of concrete structure due to surge front tsunami impacts, 10th World Congress of Computational Mechanics (WCCM), 2012 年 7 月 7 日-12 日, Sao Paulo (Brazil).
 13. 田中聖三, 堀宗朗, 市村強, M.L.L. Wijerathne, 宮村倫司, 津波力による構造物の破壊解析, 第 17 回計算工学講演会, 2012 年 5 月 29 日-31 日, 京都教育文化センター(京都府京都市).
6. 研究組織
(1) 研究代表者
田中 聖三 (TANAKA SEIZO)
東京大学・地震研究所・特任助教
研究者番号: 10439557