

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420462

研究課題名(和文) 震源から一貫して捉えた地震動・津波による重要生産・社会基盤構造物の複合応答評価法

研究課題名(英文) Evaluation of earthquake and tsunami response behavior of industrial and civil infrastructures by a theoretical method using seismological model

研究代表者

原田 隆典 (Harada, Takanori)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：70136802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：理論的方法を用いて震源から構造物系を3次元非線形系とした厳密な定式化を行い、この定式化に従って、地震動による構造物被害状態を初期条件とする3次元津波構造物応答挙動が評価できる「震源から一貫して捉えた地震動と津波による地盤・基礎・構造物系の3次元非線形複合応答評価法」を開発した。重要生産・社会基盤構造物として橋梁と貯蔵タンクに本研究の評価法を適用し、地震動と津波による構造物被害発生過程を定量的に調べた。その結果、橋梁では地震動による被害は無く津波波力と桁内に閉じ込められた空気圧で桁の流出や橋脚被害が発生すること、貯蔵タンクでは地震動で被害が生じその後の津波で被害が拡大することを解明した。

研究成果の概要(英文)：This study developed the 3 dimensional(3D)inelastic earthquake and tsunami response simulation method of industrial and civil infrastructures on the basis of theoretical method using a seismological model. In this method, the 3D input earthquake ground motions and tsunami waves at the structural sites are simulated by the seismological model, and then the 3D inelastic earthquake responses are carried out and the earthquake damages of structures are evaluated. Finally 3D tsunami inelastic responses of the damaged structures due to earthquake are performed and the structural damage processes due to the earthquake and tsunami waves are evaluated. Using this method, the damage processes of the bridges and the storage tanks are examined and it is found that the bridge damage is mainly caused by the tsunami waves only but the damage of storage tanks is resulted from both earthquake ground motions and tsunami waves and the damage expands by the tsunami waves.

研究分野：地震工学

キーワード：地震と津波複合応答 震源断層 3次元地震動 3次元津波解析 橋梁 貯蔵タンク

## 1. 研究開始当初の背景

これまでの地震工学では、地震動に対する施設やシステムの安全性確保等が主要な目標であり、津波では、早期避難情報や市民意識向上等で人的被害軽減を目標とするため、津波の発生・伝播・海岸線での津波高や到達時間の予測等が主要な目標であった。しかし沿岸部には、重要生産・社会基盤構造物が集中し、都市・産業ネットワークが形成されており、人命と経済損失を抑える都市・産業ネットワークの改良案を提案するためには、第一段階として地震動と津波による重要生産・社会基盤構造物の複合応答挙動評価法に基づいた有効な地震・津波対策法に関する研究を進展させなければならない。海溝型巨大地震では、強震動の後に津波が広域を襲うが、被害の原因やその観測記録は極めて少ないため、地震動と津波による重要生産・社会基盤構造物の複合応答挙動評価においては、理論的方法に基づき、「震源から一体的に捉えて地震動と津波による地盤・基礎・構造物系の3次元非線形応答」の分析が不可欠となる。

研究代表者は、これまで地震動に対して、震源から構造物に至る全体系応答のように線形系・非線形系を含む複合領域問題に対する定式化を行い、地震動を高速・高精度に計算する新しい方法と、材料および幾何学的非線形性を考慮したファイバー要素による基礎・構造物系の非線形応答計算手法を開発してきた。この成果は既に一部を公表したが、震源断層による永久変位を含む地表面の水平・鉛直方向の3成分の運動と共に地表面の傾きや回転に関する運動の3成分波形が、構造物の3次元非線形応答へ大きな影響を及ぼす等、従来知られていない地震動と構造物応答挙動の成果を得ている。

また研究代表者は、これまで震源から構造物までの全体系津波再現の視点から津波によるタンク、橋梁被害の再現と対策法の研究を進め、従来の非線形長波理論に震源断層破壊伝播特性を組み入れた「2次元津波解析に基づく震源から沿岸域までの津波解析法」と、「3次元津波構造物応答解析法」を組み合わせた「近似的な手法」(震源から構造物応答の近似解析法と呼ぶ)を開発し、その結果を公表してきた。ただし、研究代表者の既往の成果は、震源断層破壊により発生した地震動と津波が地殻・地中や海中を伝播し、最初に到達する地震動による3次元構造物応答とその後到達する津波による3次元構造物応答を独立なものとして取り扱っている。また震源から構造物までの3次元津波構造物応答解析では、上述のように震源から構造物応答の近似解析法を導入している。

## 2. 研究の目的

本研究では、重要生産・社会基盤構造物の地震動と津波による複合応答挙動評価法から合理的耐震・耐津波設計と補強法・対策法の確立を目指し、構造物として、円筒・球形燃

料タンク、杭やケーソン基礎を有するI型断面や箱桁橋梁を取り上げて、海溝型巨大地震の震源から一体的に捉えて地震動と津波による地盤・基礎・構造物系の3次元非線形複合応答挙動の予測法を開発し、震源断層特性や表層地盤特性および津波伝播特性・沿岸地形特性を考慮した地震動とその後作用する津波による被害発生過程を調べ、従来の耐震設計に加え耐津波設計・対策の在り方と耐震設計の改良点を明らかにする。

## 3. 研究の方法

このためには、海溝型巨大地震による強震動・津波記録や基礎・構造物系の地震動と津波による複合応答記録の不足から、(1)理論的方法を用いて震源断層から一体的に捉えた3次元津波解析法とこれによる構造物への3次元津波力計算手法の開発、(2)この津波解析法と断層破壊・地震波伝播・表層地盤特性を組み合わせた理論的方法を用いて、低角逆断層等の断層パラメータと表層地盤特性・沿岸地形特性が地震動と津波の時空間分布特性に及ぼす影響の定量化、(3)構造物基礎周辺地盤の材料非線形性を組み込んだ3次元非線形地震時相互作用を考慮した地盤・基礎・構造物系の地震動と津波による複合応答挙動の予測法の構築、(4)この予測法による地震動とその後作用する津波による構造物被害過程の定量化、(5)水路実験や被害記録による上記(1)から(5)の検討と解釈、が重要な課題となる。これらの理論的方法から、震源特性と地盤・基礎・構造物系の非線形地震時相互作用を考慮した地震動と津波による3次元非線形複合応答解析に基づく地震動と津波による構造物被害発生過程の評価等、従来の耐震設計で考慮されて来なかった津波の影響を評価し、現行の重要生産・社会基盤構造物の津波を考慮した耐震・耐津波対策法や現行の耐震設計の改良手順と方法を提案する。

## 4. 研究成果

(1)橋梁の地震動と津波による応答挙動の予測と再現解析(雑誌論文③,その他博士論文①)

2011年東北地方太平洋沖地震による地震動と津波で被災した小泉大橋を対象にその被害過程を地震動と津波による3次元非線形応答解析から解明した。地震動はこの橋梁に近い観測点の地震動を使い、3次元非線形地震応答解析を行い、各部材や支承等の応答最大歪から無被害であることや水路実験で3次元津波と橋梁への波力等を検証している。

そこでここでは、主に津波による被害再現解析の結果を述べる。

図-1と図-2は震源から小泉大橋の2次元津波解析結果と3次元津波解析領域を示す。2次元と3次元領域の津波解析の接続方法の詳細は論文①に譲るが、3次元k領域の空間を5mメッシュ情報から3次元地形を作成した(図-3と図-4)。この橋は桁橋なので空気

が留まる桁内（床板と桁で囲まれた空間）の最少メッシュサイズを0.25mとし橋から離れた沖合のメッシュは0.5m~1.0mと粗くし、津波の入射境界と津波が通り過ぎて反射しない放射境界（透過境界）を設定した。3次元領域は約3000万メッシュのモデルとした。

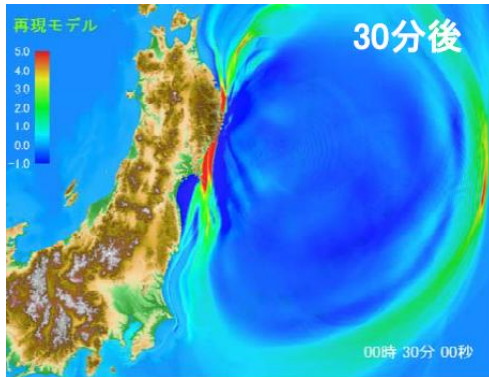


図-1 2次元津波解析結果

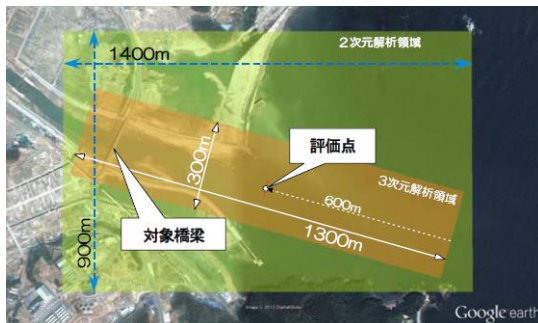


図-2 2次元と3次元解析領域

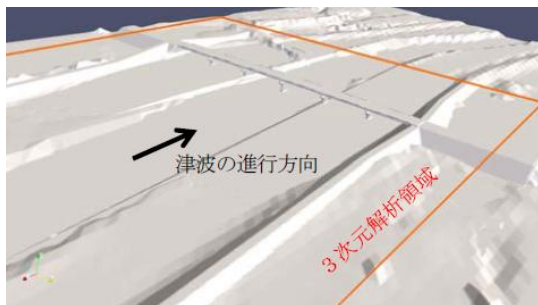


図-3 次元解析領域と3次元空間モデル

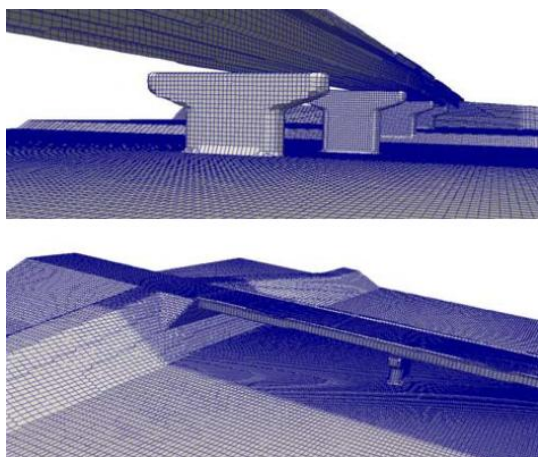


図-4 3次元解析モデル（メッシュモデル）

小泉大橋を含む周辺解析結果（37.7分後）を図-5に示す。この図から津波が橋を乗り越え始めていること、両サイドの橋台背面の道路盛土も津波が乗り越えていることがわかる。津波が道路盛土を乗り越えているため、橋台側の水位が増加し橋梁の桁上を中央に向かって津波が流れる様子もわかる。このような道路盛土と河川堤防を津波が早い流速で越流するため、この部分が洗掘されたという被害状況と整合する。

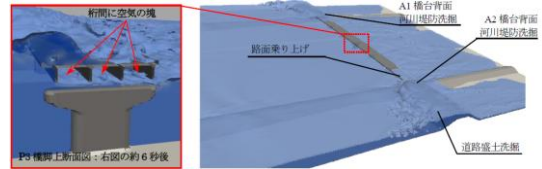


図-5 3次元津波解析結果（37.7分後）

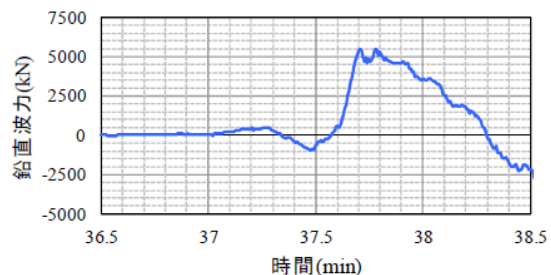


図-6 3次元津波解析の鉛直波力の時刻歴

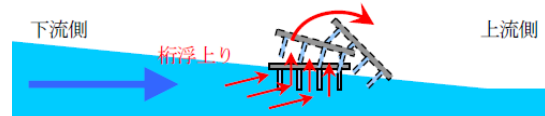


図-7 3次元津波解析による桁流出の仕組み

図-6は、橋梁中央部の1径間分の合計鉛直波力の時刻歴を示す。この図より、桁に津波が衝突し上部工を越流し始めた時点（37.7分付近）で最大の鉛直方向波力となっている。鼓の鉛直波力は約5000kNにも達し桁の死荷重（桁1径間の自重は約3500kN）より大きいため、鉛直方向に浮き上がる結果となった。このことから、図-7のように桁が流出したといえる。なお、鉛直最大荷重後、鉛直波力が低下するのは、津波が桁を覆いかぶさり下方に抑える力が発生したためである。

（2）貯蔵タンクに対する地震・津波応答挙動の予測と被害判定法（雑誌論文②～⑤, その他博士論文②）

（1）の3次元地震動・津波複合応答解析手法により、ある架空の生産施設に設置した構造物に対する地震と津波の数値シミュレーションを行い、その適用事例を示しながら諸元の異なる構造物に対しての被害判定方法の提案とそこから予測される被害のシナリオについて述べる。

図-8に3次元津波解析の空間モデルや配置した構造物の諸元および設定した境界条件を図-9に球形タンク設置付近のメッシュ図

を示す。本検討では、250m×300m の解析空間モデルを設定しており、その中に様々な形状の構造物を検討の対象として配置している。空間モデルのメッシュ数は約6000 万程度である。本検討で設定した造波条件は解析事例を示す想定した造波として津波高さが水面から5.0m とし、流速は6.0m/s の時刻歴による造波条件を設定した。

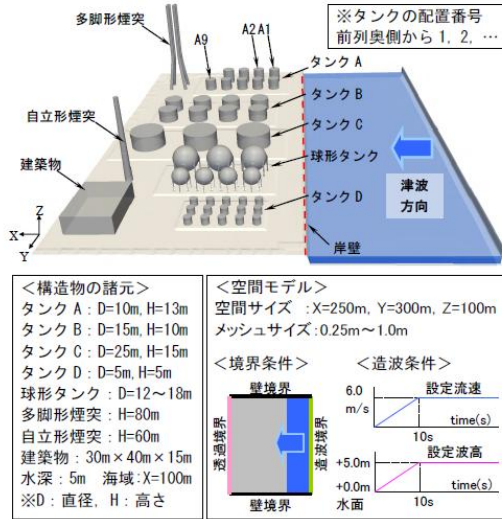


図-8 3次元津波解析のモデル化条件

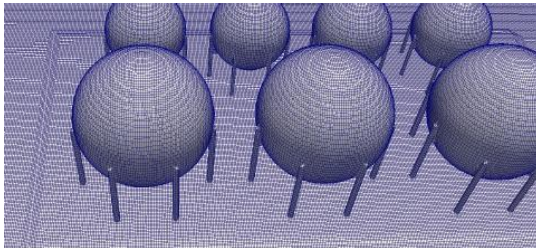


図-9 津波解析のメッシュ(球形タンク)

本研究の構造解析モデルは、円柱タンクの外壁には非線形シェル要素をタンク底面には摩擦係数が時々刻々と変動しながら摩擦力と浮上りを考慮できるWinkler モデル(原田ら, 2007)を設定した。このモデルの特性は水平方向においては自重と津波水平力による時々刻々と変化する押し込み力に比例した摩擦力が発生する。鉛直方向において押し込み力については硬いバネ剛性で抵抗し、浮き上がる力については抵抗しない設定となっている。なお、Winkler モデルの下端側は固定としている。球形タンクの球殻と支柱は非線形シェル要素、筋かいはファイバー要素でモデル化を行い部材の分割を10 分割程度施して部材座屈が表現できるようにしている。このようにモデル化をすることで筋かいが部材座屈した場合には、荷重低下によって周辺部材への荷重分担が変化する。なお、破壊に達した部材については前述した通りである。非線形シェル要素及びファイバー要素には応力-ひずみ関係の2 次勾配がE/100 のバイリニア型移動硬化則を設定した。地震応答解析での内

容液のモデル化には、タンクの形状に応じて簡便な近似式のHousner もしくは速度ポテンシャル理論に基づく地震時の動水圧分布モデルを用いて算出した付加質量をタンク外壁に設定することにより流力弾性振動(バルジング)の影響を考慮した。このモデル化によって正確な流体挙動(スロッシングによる液面揺動や屋根への衝突力など)は考慮できないが、地震時に主として作用する動水圧の影響を側板に与えることができる。

### 1) 地震応答解析結果

図-10 に円柱タンクの地震作用時の応力コンター図を示す。内容液が満液の場合には内容液の質量に慣性力が働き、側板の下段側で変形が確認できる。この変形は約3cm 程度の面外変形の膨らみとなっており、象の足座屈のような現象である。また、側板の中段から上段側にかけても応力値の高い箇所が確認できる。これは側板の板厚が高さ方向に徐々に薄く変化していることが原因と考えられる。内容液が50%の場合には、質量が小さくなり作用位置が低くなることで応答が小さくなったと考えられる。よって、内容液の容量によって地震時の損傷状態が変わることが分かる。

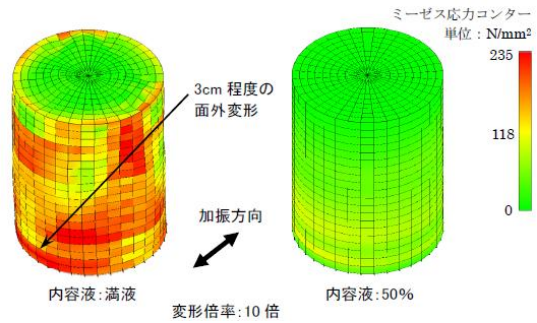


図-10 円柱タンクAの地震応力コンター図

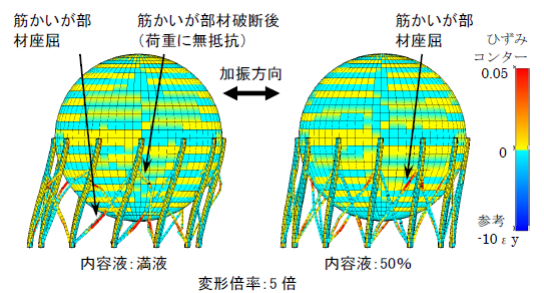


図-11 球形タンクの歪コンター図(筋かいは)

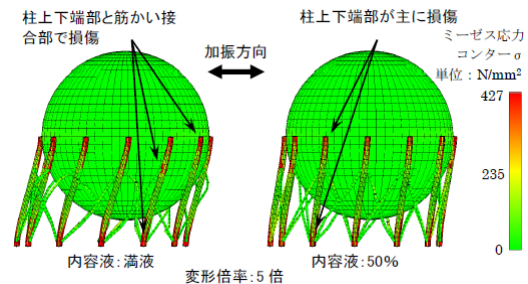


図-12 球形タンクの歪コンター図(殻、支柱)

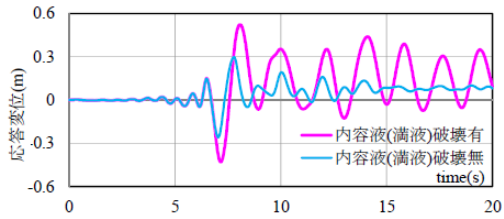


図-13 球形タンク頂部の地震応答水平変位

球形タンクの筋かいに着目したひずみコンターを図-11 に、球殻と支柱に着目した応力コンターを図-12 に示す。球形タンクは、まず初めに筋かいが損傷（部材座屈及び破断）する。その影響によって構造全体の変形量が大きくなり支柱が受け持つ荷重の負担が大きくなる。その結果、支柱の上端と下端で降伏応力を超える応力が発生する。筋かいについてはほぼすべてが破壊した結果となった。なお、円柱タンクと同様に内容液の容量が少なくなることによって損傷が小さくなる。

図-13 に球形タンク球殻頂部の水平変位を示す。本検討では部材破壊を考慮した解析を行っているが、その効果を確認するために部材破壊を考慮しない解析結果と比較し、部材破壊の考慮有無で水平変位の大きさや破断後の挙動に大きく影響することが分かった。

## 2) 津波応答解析

図-14 に施設全体に作用する津波の状態を図-15 にタンクA 周辺に作用する津波の状態を示す。タンク前面に作用する津波の水位が高く背面側は低くなっていることが分かる。

図-16 に最前列にあるタンク前面の高さ方向の圧力を示す。圧力が高さ方向に高くなるにつれて小さくなっていることが分かる。18秒付近がピークとなっており、その後はほぼ一定となっている。図-17 にタンク下端の円周方向の圧力を示す。前面に比べて側面と背面の圧力は小さいが、時間と共に緩やかに大きくなっている。

これらの圧力を構造解析モデルに作用させる。地震作用の結果を受けて球形タンクが崩壊したと仮定した場合には、3次元津波応答解析において球殻が地上に接触した状況が予測できる。図-18 に球形タンクが崩壊したと予測した場合の3次元津波解析結果を示す。図のように本来であれば球殻の下を通過する津波が衝突して堰き止めていることが分かる。なお、座屈によって支柱と筋かいからの支持力がないため、まともな抵抗力はないと考えられ、図中の赤矢印のように周辺の構造物への衝突が懸念される。このように地震作用の結果を受けて津波応答解析に影響のある構造物については、結果を踏まえて別途検討を行うことも被害シナリオを把握するうえで重要と考えられる。

これらを踏まえて地震と津波を作用させた被害判定結果を表-1 に示す。表内の結果は海側の最前列の構造物の判定を行っている。

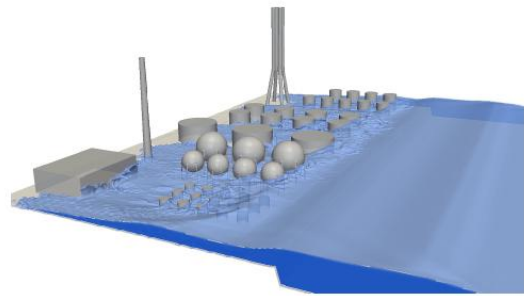


図-14 施設全体に作用する津波状態 (t=25s)

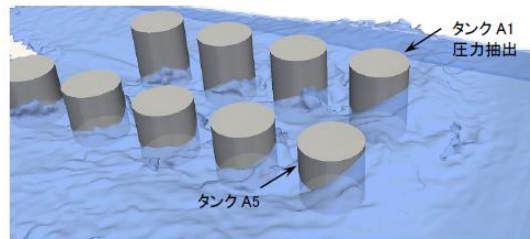


図-15 タンク A 周辺の津波状態 (t=25s)

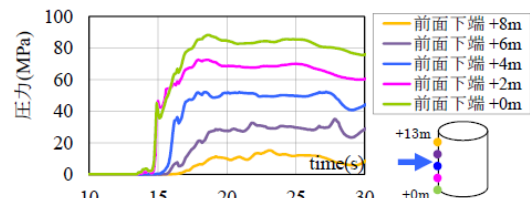


図-16 タンク A1 全面の圧力

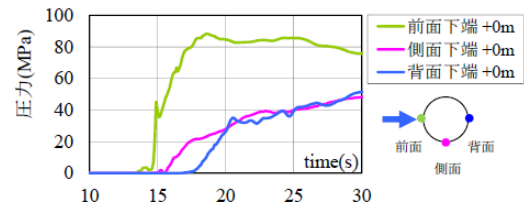


図-17 タンク A1 下端の周辺方向圧力

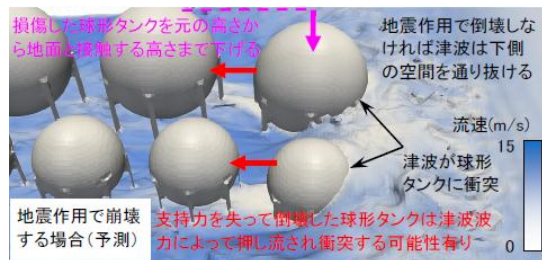


図-18 地震で被災後に津波被害が拡大する球形タンク

表-1 貯蔵タンクの被害判定

対象	容量	地震作用	津波作用
円柱	満液	×：座屈	△
タンクA	50%	○	△
円柱	満液	△	○
タンクB	50%	○	△
円柱	満液	○	×：浮上りなど
タンクD	50%	○	×：浮上りなど
球形	満液	×：座屈	×：予測シナリオの場合
タンク	50%	△	○

※○：無損傷、△：やや損傷、×：損傷

(3) 熊本地震による断層永久変位を含む地震動と橋梁被害の再現解析 (雑誌論文①)

本研究で開発した震源断層モデルを使った地震動・津波・構造物 3次元非線形複合解析方法のうち、津波解析を除いた解析により、2016年熊本地震の断層永久変位を含む観測地震動と橋慮被害の再現解析を行い本方法の検証を行った。今後の断層近傍構造物への大きな上下動を含む地震動と断層変位の影響を調べる有用な方法であることを示した。

#### 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5件)

① 本橋英樹, 野中哲也, 馬越一也, 中村真貴, 原田隆典: 熊本地震の断層近傍における地震動と橋梁被害の再現解析, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 63A, 2017, 339-352.

② 坂本佳子, 坂本義則, 菅付紘一, 原田隆典, 野中哲也: 貯蔵タンクの津波漂流対策のについての検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, Vol. 72, No. 2, 2016, I\_949-I\_954.

③ 金井則之, 本橋英樹, 野中哲也, 中村真貴, 古村孝志, 原田隆典: 工場内津波浸水予測および対策への広域 3D 津波シミュレーションの適用, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, Vol. 71, No. 2, 2015, I\_515-I\_520.

④ 菅付紘一, 原田隆典, 野中哲也: 貯蔵タンクに対する地震・津波被害の判定方法, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, Vol. 70, No. 2, 2014, I\_822-I\_827.

⑤ 菅付紘一, 原田隆典, 野中哲也: 沿岸地域の生産施設に対する地震・津波被害の判定方法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, Vol. 70, No. 2, 2014, I\_886-I\_890.

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他] (博士論文2件)

①坂本佳子: 数値シミュレーション技術を用いた橋梁の津波被害機構に関する基礎的研究, 宮崎大学大学院博士学位論文, 2015, 宮崎大学学術情報リポジトリ, <http://hdl.handle.net/10458/5331>

②菅付紘一: 数値シミュレーション技術を用いた重要生産施設の地震動と津波による複合応答挙動の予測法とそれに基づく被害評価法, 宮崎大学大学院博士学位論文, 2016, 宮崎大学学術情報リポジトリ, <http://hdl.handle.net/10458/5862>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 隆典 (HARADA, Takanori)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号: 70136802

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号:

(4) 研究協力者

野中哲也 (NONAKA, Tetsuya)

本橋英樹 (MOTOHASHI, Hideki)

児玉喜秀 (KODAMA, Yoshihide)

菅付紘一 (SUGATSUKE, Koichi)

坂本佳子 (SAKAMOTO, YOSHIKO)

宇佐美勉 (USAMI, Tsutomu)

村上啓介 (MURAKAMI, Keisuke)