

貯蔵タンクに対する津波被害の判定方法

Determination Method of Tsunami Damage to Storage Tank

菅付絢一¹・原田隆典²・野中哲也³・中村真貴⁴・馬越一也⁵

Koichi SUGATSUKE, Takanori HARADA, Tetsuya NONAKA

Masaki NAKAMURA and Kazuya MAGOSHI

In this paper, the tsunami damage determination method of the storage tank is proposed. The tsunami damage determination was performed combining three-dimensional tsunami analysis and structural analysis. First of all, three-dimensional tsunami analysis was conducted and the pressure which acts on a tank was computed. Next, the structural analysis model which can express a tsunami damage situation was created, and the computed wave force was made to act. In addition, the tsunami damage determination was performed from the structural analysis result. From this result, it was possible to confirm the usefulness of the damage determination tsunami of the tank by the proposed method. Finally, it was confirmed that was resisted the tsunami by installing the anchor bolt and the behavior lifted by the amount of solution in the tank is changed.

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震で発生した津波により、道路、ライフライン、構造物が被災して甚大な被害を受けた。その中で貯蔵タンクが津波によって滑動や浮上りといった被害を受けており、津波に対しての対策がほとんど施されていないことが浮き彫りとなった。また、消防庁(2009)より過去に起こった大規模地震において貯蔵タンクへの被害報告がなされている。

貯蔵タンクは、重要生産施設である石油コンビナートや化学薬品工場および港湾航空施設内に多数設置され、中には非常に重要で危険な内容物を保管する役割を担っている。そのため、それらが津波によって損傷して内容物が外部へ流出することは広範囲への2次災害を引き起こす原因となり、人命に関わることから避けなければならない。

貯蔵タンクに対する津波被害の予測手法の提案が消防庁(2011)からなされている。その貯蔵タンクの津波被害の判定方法は、津波の浸水深と流速の関係によって単純化して算出した外力を用い、静的な荷重として構造解析を行い判定するものである。しかし、実際の円柱構造物に作用する圧力は、地形の形状やタンクまでの到達距離の違いによって3次元効果の影響を受けて圧力分布が時々刻々と変化する。本来、構造物の津波による損傷を判定するには、相互作用を考慮した連成解析であれば1

度の計算で精度の良い結果を得られることから有効と考えられる。しかし、比較的解析領域が大きくなる解析対象の場合では、解析時間の増大や計算機の性能において高いパフォーマンスが求められる。一方で、異なる解析ツールを組合せて被害判定を行うことができれば、専門性に特化した手法を効率よく有効に利用することができる。野中ら(2012)は、これまでに構造物を対象とした2次元津波解析と3次元津波解析および構造解析を異なる解析ツールを組合せた全体系解析によって津波被災状況の再現を試みている。

そこで、本研究では同手法を参考にして津波が貯蔵タンクに及ぼす津波被害のメカニズムを3次元流体解析ツール及び構造解析ツールを組合わせて現象を解明し、その適用事例から津波に対する被害判定の方法について提案する。また、貯蔵タンクが津波に対して被害を受けた場合の貯蔵量の変動による影響検討や補強方法の一例としてアンカーボルトを適用した場合の効果についても参考に示す。

2. 貯蔵タンクの被害形態

津波によるタンク本体の被害形態として、①浮き上がり、②滑動、③転倒、④内外水圧や波力による側板座屈、⑤タンク傾斜による底板抜け出し、⑥タンク傾斜による側板座屈の6つのパターンが挙げられる(図-1)。消防庁から提供されている津波被害シミュレーションツールでは、津波浸水深と流速などの入力条件で①と②についてのみ判定を行うことができるが、③～⑥についての判定を行うことができない。

そこで、本検討では①～⑥の全ての損傷形態を評価することを対象とする。なお、津波による基礎の洗掘や崩壊現象もあるが本検討では対象外とする。

1 正会員 修(工) (株)地震工学研究開発センター
2 正会員 工博 宮崎大学教授工学部社会環境システム工学科
3 正会員 博(工) (株)地震工学研究開発センター
4 正会員 博(工) 宮崎大学研究員工学部社会環境システム工学科
5 正会員 修(工) (株)耐震解析研究所

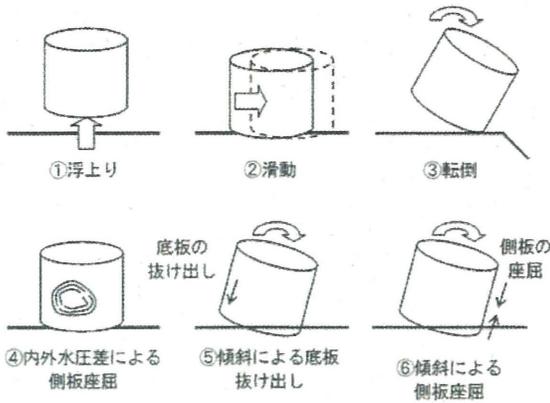


図-1 貯蔵タンクの被害形態

3. 被害判定方法

本提案の被害判定方法の基本的な考え方は、津波の流れと構造の損傷形態について異なる解析手法を組み合わせることで、実現象をできるだけ表現できるように解析して被害判定を行うものである。被害判定としては、津波波力およびそれに伴った浮力を漸増させてタンク自体が浮き上がりや滑動等によって解析が不安定になった時点を終局状態とした。

本判定の手順は、まず想定される造波（津波高さや流速）による3次元津波解析を行い、タンク外壁に作用する圧力を抽出する。次に、津波解析で得られた圧力（波力）を外力とした3次元構造解析の2つのステップからなる。本解析では、流体と構造の相互作用性の強い完全な連成問題や構造物が津波によって流されて他の構造物

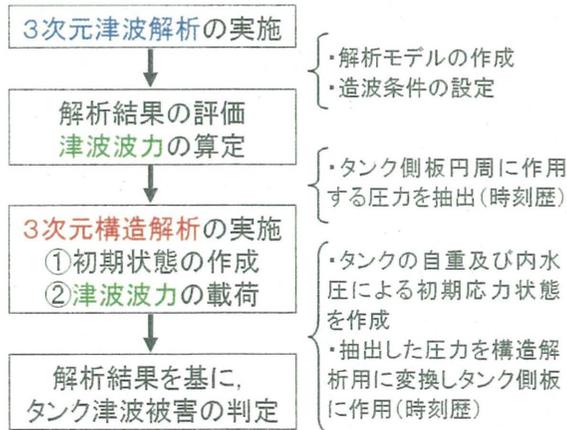


図-2 被害判定フロー

に衝突するといった漂流計算を解くのではなく、タンクが①～⑥の被害を受けるかどうかの判定に着目する。この2つの解析方法を使った判定手順を示すと図-2のようなフローとなる。

4. 津波解析

(1) 津波解析ソフト

本解析ではOpenFOAM (OpenFOAM, 2010) 内にあるソルバの中で非圧縮性の気液二相流の解析が行えるinterFoam を使用して3次元津波解析を実施した。離散化手法としては有限体積法を、自由表面流体解析モデルにはVOF法を採用している。なお、乱流によるタンク周辺の圧力損失を考慮する必要があると考え、乱流モデル(LES)を採用している。坂本ら(2013)は、interFOAMと円柱構造物を対象とした水理実験と解析(Wijtmiko, 2010)とで精度良く一致した実績のある解析ツールCADMAS-SURF/3D(財)沿岸技術研究センター, 2010)を用いて橋梁(I桁橋)を対象とした比較検討を行っている。その中で、空気塊のできない条件では両ソフトにおいて圧力などが精度よく一致する結果を得られており、間接的にinterFOAMの精度を確認している。また、松浦ら(2013)はinterFOAMを用いた流体解析の基礎的な精度検証を行っている。

(2) 津波解析モデル

対象タンクは、直径および高さが5.0mでH/Dが1程度の容量500m³未満の被災しやすい小型貯蔵タンクとした。モデル空間のメッシュ分割は、X方向に500分割、Y方向に120分割、Z方向に45分割とした。タンク付近のメッシュサイズは円形の形状を正確にモデル化するために最小で0.25m幅としており、メッシュ数はモデル全体で約270万メッシュとなった。図-3に対象タンクのメッシュ図を示す。モデル空間の境界条件としては、タンク

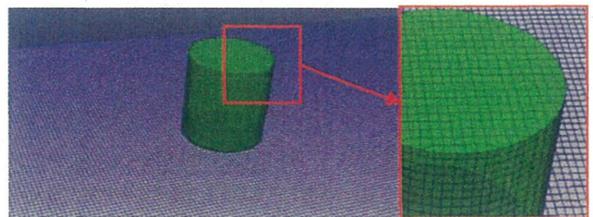


図-3 対象タンクのモデルメッシュ図

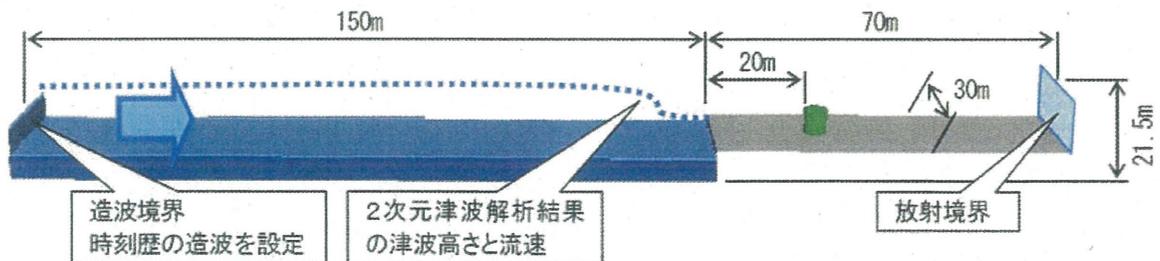


図-4 対象タンクの解析条件

後方陸側の境界面は波が反射しないように放射境界を、津波進行方向の両側側面には壁境界を定義した(図-4)。

本解析の造波条件は、事前に実施した2次元津波解析(非線形長波理論)の結果から得られる流速と津波高さを参考に定義した。対象位置は、宮崎県の宮崎空港の護岸近辺に津波が到達することを想定し、その近辺の津波高さと流速を使用した。2次元津波解析を参考に定義した津波高さは5.0m、流速は6.0m/sである。この位置を想定した理由は、震災で仙台空港の小型タンクが流出した被害例があり、同様のシチュエーションで浸水する恐れがあるためである。ただし、対象のタンクは実際に存在するタンクではなく本提案の被害判定の一例としたものである。造波境界から発生させる津波の形状には、最大波高に到達するまでに10秒間かけて徐々に造波させる段波状の造波を設定した。これは造波境界から急激に造波を行うと、波の表面形状が崩れて想定した津波高さにならないためである。

(3) 津波解析結果

図-5に護岸近辺の抽出した水位を示す。図より徐々に水位が高くなり、34秒付近で想定した津波高さまで到達している。40秒以降に水位が高くなっているのは、タンクに衝突した津波が反射によって戻されたためである。図-6にタンク前面の下端位置と下端から+3m位置の圧力を示す。図より30秒付近から圧力が発生しており、40

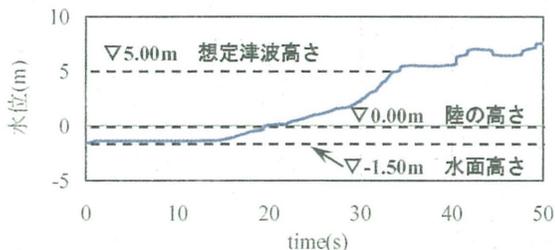


図-5 護岸近辺の水位変動

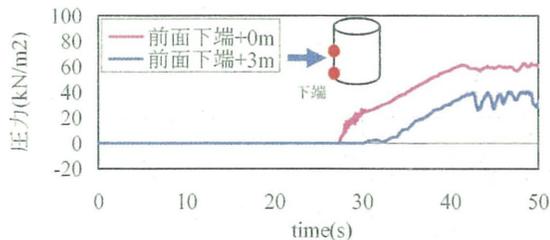


図-6 タンク前面の圧力

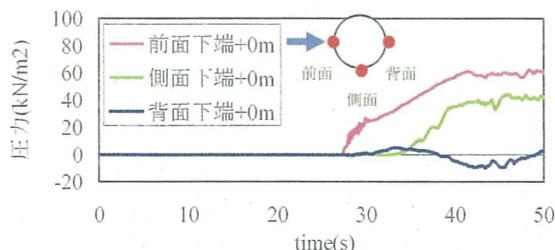
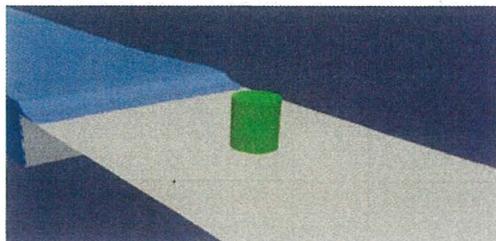
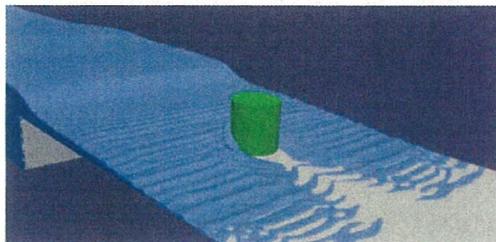


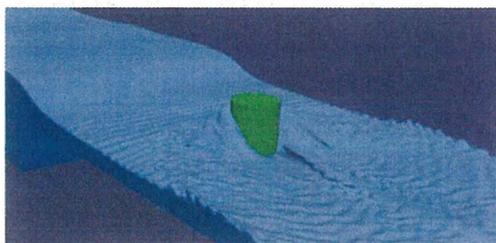
図-7 タンク円周方向下端の圧力



(a) t=25s



(b) t=30s



(c) t=35s



(d) t=40s

図-8 津波衝突時のスナップショット

秒付近で圧力が一定(最大値)となっている。下端から+3m位置が高くなると圧力値が小さくなっており、これは静水圧分布と同様の関係となる。図-7にタンク下端位置の前面と側面および背面の圧力を示す。タンク前面と側面においては圧力が徐々に大きくなって一定となるが、タンクの背面では少しの圧力が作用した後に負圧が発生している。これはタンク背面に水が回り込んだ際に渦現象が起きて水の流れが円柱背面から離れようとするので負圧が発生したものと考えられる。図-8に津波が護岸を乗り越えてからタンクに衝突するまでのスナップショットを5秒間隔で示している。図より津波が護岸を乗り越える際に3次元効果の影響で津波の水表面が急降下して陸上を遡上していることが判る。このように海側から陸側へ乗り上げる際に流速が急激に速くなって遡上することになる。つまり、護岸などの地形の変化がある場合には、

その地形の変化によって津波遡上時の津波高さや流速が急激に変化する。津波高さや流速が変化するという事は、タンクに衝突する際に発生する圧力分布にも影響することから被害判定の結果を左右することになる。このような3次元効果による現象やタンクに回り込む際の圧力分布の変化は2次元津波解析では求めることが難しい。

5. 構造解析

(1) 構造解析モデル

構造解析ソフトには、材料非線形性と幾何学非線形性による複合非線形性を考慮できる SeanFEM(ver.1.22)を使用した。消防庁(2009)の解析によれば、解析モデルの材料の応力-ひずみ関係は線形関係でモデル化していることから、本検討では材料非線形モデルを使用した。構造解析モデルはタンク全体を非線形シェル要素でモデル化する(図-9)。タンク底面のモデル化方法には、摩擦力と浮上りを考慮できる Winkler モデル(原田ら, 2007)(図-10)を用いており、パラメータについては研究成果を基に、貯蔵タンクに適する物性値を設定した。この Winkler モデルの特性は、水平方向において、押さえる力(自重と津波水平力による押し込み力)に比例した摩擦力が発生する。鉛直方向においては、押し込み力(圧縮側)は硬いバネ剛性で抵抗し、浮き上がる力(引張側)については抵抗しない設定となっている。

荷重条件は、初期状態としてタンクの自重と内溶液による静水圧を作用させた状態に津波が作用することによって時々刻々と変動する津波波力と浮力を作用させた(図-11)。まず、初期状態はタンク側板の鋼材重量とタンクの内溶液を静水圧としてかけた場合の応力状態とした。次に、浮力についてはタンク前面と背面とで水位の変動が異なるため、タンク前面側と背面側で浮力の発生する荷重が異なる。そこで、タンク周辺の時々刻々の水

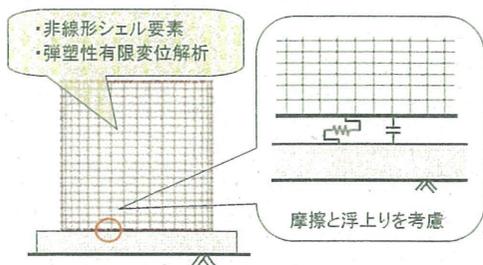


図-9 構造解析モデル概要

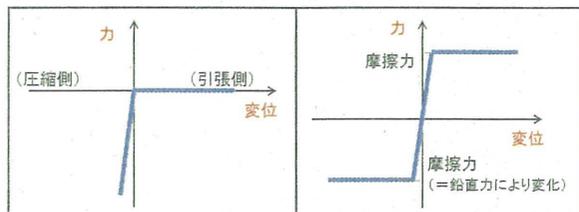


図-10 底面バネのモデル化

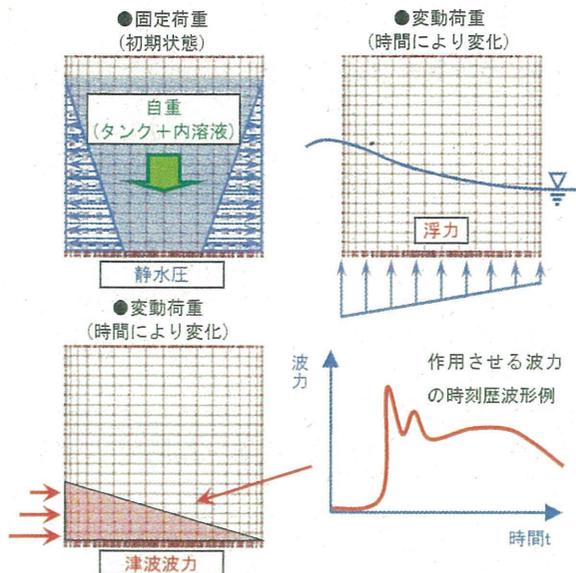


図-11 タンクに作用させる外力

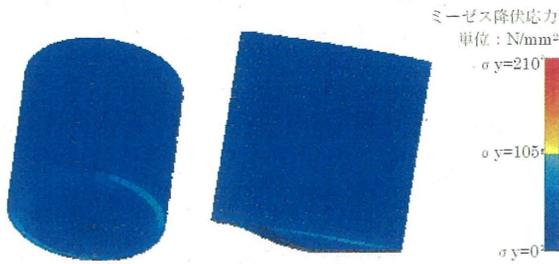
位変動がわかることから、それを元にタンク底面に作用する各位置での算出した浮力を動的な上向きの荷重として作用させた。最後に、作用させた波力は前述した3次元津波解析より円周方向の圧力を抽出し、構造解析モデルの同じ位置に動的荷重として作用させた。このようなモデル化および解析を行うことで、タンクに津波波力が作用した際の損傷状態が表現可能となる。

(2) 構造解析の検討ケース

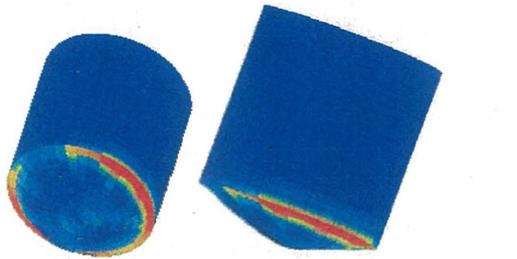
構造解析の検討ケースとして、次の3ケースについて実施した。貯蔵タンクは稼動状態によって貯蔵量が変動する場合があることから、内溶液の静水圧が作用しない空の状態(ケース1)と満液の状態(ケース2)を検討した。さらに、小型のタンクの設置条件として、タンクの下端がアンカーボルトによって固定されている場合と固定されていない場合があるため、内溶液が満液の場合でアンカーボルト有り(ケース3)についても検討した。想定したアンカーボルトはM22相当とし、円周方向に6本取り付けられた。

(3) 構造解析結果

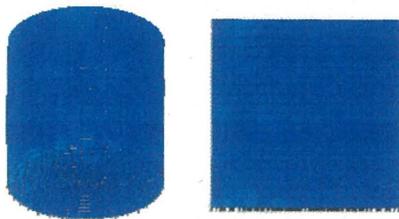
図-12に各ケースの構造解析結果のスナップショットを示しており、色は側板のミーゼス応力コンターを示している。まず、ケース1は、内溶液が無いことで浮力が働きやすく、側板の損傷を伴うことなく浮き上がったと考えられる。図-13に各ケースのタンク前面下端の鉛直変位を示している。図より28秒付近でケース1の鉛直方向に変位が発生していることから浮き上がっていることが判る。グラフの線が途中で終了しているのは、浮き上がることで解析不安定になって計算が終了していることを示す。次に、ケース2については内溶液があることで浮力に対して抵抗することができるが、津波波力によってタンク



(a) ケース 1: 内溶液 (空) アンカーボルト無し



(b) ケース 2: 内溶液 (満液) アンカーボルト無し



(c) ケース 3: 内溶液 (満液) アンカーボルト有り

図-12 構造解析結果スナップショット (変形倍率 10 倍)

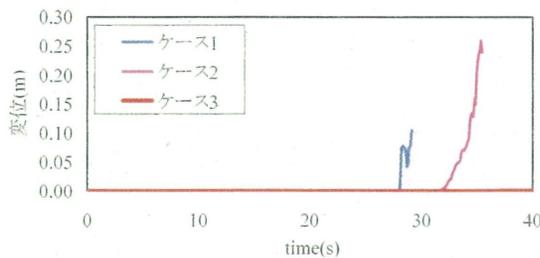


図-13 タンク前面下端の鉛直変位

が倒れだすことから、底板の抜け出しが起こっている。図-13 の鉛直変位からケース 1 よりも粘るように抵抗しているが、最終的には浮き上がる結果となった。最後に、ケース 3 はアンカーボルトを設置することで浮上りに対して抵抗力が増えて津波波力が最大値となる 40 秒付近においても浮き上がることが無かった。これらの結果より、内溶液の有無によってタンクの流出過程が変わることが判った。また、タンク下端にアンカーボルトを設置することで浮き上らない結果となったことから、アンカーボルトの設置は津波の補強対策として有効と考えられる。

6. おわりに

本研究では、貯蔵タンクに対する津波被害の判定方法

について異なる解析ツールを組み合わせる方法と試算例を示した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 3 次元津波解析より、海域から陸域へ遡上する際に 3 次元効果の影響で津波高さと流速が急激に変化することが判った。
- (2) 3 次元津波解析より、タンク側板に時々刻々と作用する圧力を算出することができた。また、タンクの円周方向の圧力は位置によって大きく異なり、タンクの背面では負圧が発生する。
- (3) 3 次元津波解析より算出した動的な圧力を構造解析モデルに作用させて貯蔵タンクの損傷状態を判定できた。その結果、ケース 1 と 2 より損傷形態である①浮き上がり、②滑動、③転倒、⑤タンク傾斜による底板抜け出しが表現できていることが判った。
- (4) また、アンカーボルトを設置することによって浮上りに対して抑える効果があることが判った。

以上より、本研究で提案する方法は、津波被害判定の方法論として有効であると考えられる。今後の検討課題としては、本提案する判定方法において流体および構造解析の精度検証や地震による損傷も考慮した地震と津波の複合応答を考えた損傷判定が必要と考えられる。

参考文献

- 消防庁 (2009) : 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書,
http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h21/2105/210526-1houdou/02_stunami_houkokusyo.pdf 参照
- 消防庁 (2011) : 東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方係る検討報告書,
http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h23/2312/231222_1houdou/02/index.pdf 参照
- 野中哲也・本橋英樹・原田隆典・坂本佳子・菅付絃一・宇佐美勉 (2012) : 津波波源から橋梁までの全体系津波再現解析, 第 15 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.25-32.
- OpenFOAM ユーザー会, 一般社団法人オープン CAE 学会 (2010) : OpenFOAM ユーザガイド和訳, 2010.
- (財) 沿岸技術研究センター (2010) : CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 2010.
- 坂本佳子・原田隆典・野中哲也・吉野廣一・鳥越卓志 (2013) : I 桁橋に対する津波波力特性の数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.450-458, 2013.
- Wijtmiko, I・Murakami, K (2010) : Numerical Simulation of Tsunami Bore Pressure on Cylindrical Structure, 海洋開発論文集, 第 26, pp.273-278, 2010.
- 松浦翔・森貴寛・坂谷太基・川崎浩司 (2013) : OpenFOAM を用いたダムブレイク解析とその精度検証, 土木学会中部支部研究発表会, 2013.3, pp.147-148.
- 原田隆典・野中哲也・馬越一也・岩村真樹・王宏沢 (2007) : ファイバー要素を用いた地盤・基礎の非線形動的相互作用モデルとその橋梁全体系の地震応答解析への適用, 応用力学論文集, 2007.8, Vol.10, pp.1047-1054.