

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：82658

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05152

研究課題名(和文)分散メモリ並列MPM-MPS連成解析手法の開発と盛土に対する津波越流・洗掘解析

研究課題名(英文) Development of distributed memory parallel MPM-MPS coupled analysis method and numerical analysis of scouring of embankment due to overflow induced by tsunami

研究代表者

室谷 浩平 (Murotani, Kohei)

公益財団法人鉄道総合技術研究所・鉄道力学研究部・主任研究員

研究者番号：20434061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：東北地方太平洋沖地震では、津波による鉄道盛土、道路盛土の被害が多く発生した。このような津波による被害は、波圧による破壊よりも長時間の越流による洗掘の方が深刻であることが、被害調査分析や模型実験を用いた検討により報告されている。そこで、盛土に対して津波越流による洗掘解析を実施できる解析手法の開発を目的とした。津波越流解析にはMPS、洗掘解析にはMPMを用い、連成界面において適切な変形・分離・結合と効率的な物理量の受け渡しを実現できる連成解析手法を開発し、開発した解析手法を用いた盛土の洗掘実験の再現解析を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

洗掘解析においては、盛土周辺における水の流れと盛土および支持地盤を構成する地盤の変形を解析可能な手法が必要となる。これまでMPS-DEMやSPH-DEMの連成解析手法開発が行われている。しかしながら、DEMでは粒子の集合体でモデル化するため、解析モデルの粒子最小サイズに限界があり、盛土や支持地盤のような砂質土または粘性土を正確にモデル化することは難しい。そこで、変形レベルに拘わらず地盤を弾塑性体として扱うことが可能なMPMを地盤の解析モデルとして採用し、MPMとMPSを連成した解析手法の開発を行った。本洗掘解析の結果より、洗掘時の流速と地盤内のひずみ集中箇所を把握できるようになった。

研究成果の概要(英文)：In the off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, damage to embankments caused by scouring due to overflow induced by tsunami occurred. In order to predict the extent of scouring, MPM-MPS coupling method was developed. The effectiveness of the developed method was verified through reproduction analyses of the model experiment of scouring of embankment due to overflow induced by tsunami.

研究分野：並列計算手法

キーワード：洗掘解析 MPM MPS 連成解析

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震では、津波による鉄道盛土、道路盛土の被害が多く発生した。このような津波による被害は、波圧による破壊よりも長時間の越流による洗掘の方が深刻であることが、被害調査分析や模型実験を用いた検討により報告されている。今後は、実地形モデル上で津波の挙動を予測し、盛土の洗掘被害を予測・評価することが望まれるが、模型実験のみの検討は、大きなコストと時間が必要となり、多くのケースを検証することができない。縮小モデルでのスケールが限られた検討となる。本テーマでは、模型実験での検討をさらに深度化するツールを構築することを目的に、数値解析による洗掘解析手法を開発する。これにより、将来予想される南海トラフ地震などでの洗掘被害を予測し対策することが可能となる。さらに、近年被害が多い、河川橋りょう橋脚の洗掘被害の予測、対策技術の評価方法の開発に向けた基盤ツールになる。

2. 研究の目的

盛土に対する洗掘解析では、盛土周辺における水の流れと、盛土および支持地盤を構成する地盤の変形を解析可能な手法が必要となる。前者については、非圧縮性流体を扱う解析手法として実績のある、Moving Particle Simulation (MPS) や Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) が有効である。後者については、地盤の弾塑性変形に加え、地盤が離散化し、流水により流出される状態を扱う必要があるため、Discrete Element Method (DEM) や Material Point Method (MPM) 等の地盤の大変形を扱うことが可能な手法が有効である。例えば、既往の研究において、MPS-DEM⁽¹⁾や SPH-DEM⁽²⁾の連成解析手法開発が行われている。しかしながら、DEM では粒子の集合体でモデル化するため、解析モデルの粒子最小サイズに限界があり、盛土や支持地盤のような砂質土または粘性土を正確にモデル化することは難しい。そこで、本研究では、変形レベルに拘わらず地盤を弾塑性体として扱うことが可能な MPM を地盤の解析モデルとして採用し、MPM と MPS を連成した MPM-MPS 連成解析手法の開発を行った。

3. 研究の方法

3.1. MPM (Material Point Method)

MPM は解析対象を、質量を有した仮想の粒子群でモデル化し、粒子背面に設定した格子(以後、背面格子)で計算したひずみ増分より各粒子での応力を計算する。この応力やひずみ、質量等の物理量を、内挿関数を通じて背面格子の格子点に集約し、内力および外力ベクトルを計算する。これらのベクトルと格子点に集約した質量から加速度ベクトルを計算して速度ベクトルを更新する。更新した速度ベクトルを用いて粒子の位置を更新するとともに、格子内のひずみを計算し、次計算ステップの粒子の応力を求める。その後、格子は元の位置に戻る。なお、粒子自体は個別に挙動するため、上記のプロセスで粒子が有する物性(剛性、強度等)が混合することはない。

3.2. MPS (Moving Particle Simulation) 法

MPS は解析対象を、質量を有した仮想の粒子群でモデル化し、粒子同士の相互作用を用いて、ナビエ-ストークス方程式を解く手法である。MPS では、外力と粘性力により粒子を移動した後、密度が一定になるように粒子の圧力を求め、粒子の位置と速度を更新する。その際に、速度や圧力の勾配とラプラシアンを計算する必要があるため、影響範囲内にある粒子の物理量を用いて勾配とラプラシアンを、MPS の微分作用モデルを用いて計算する。なお、MPS は、MPM とは異なり格子を用いず、影響範囲内の粒子が持つ物理量を用いて計算する。

3.3. 相互作用力

図1に MPM-MPS 連成解析手法の概要を示す。

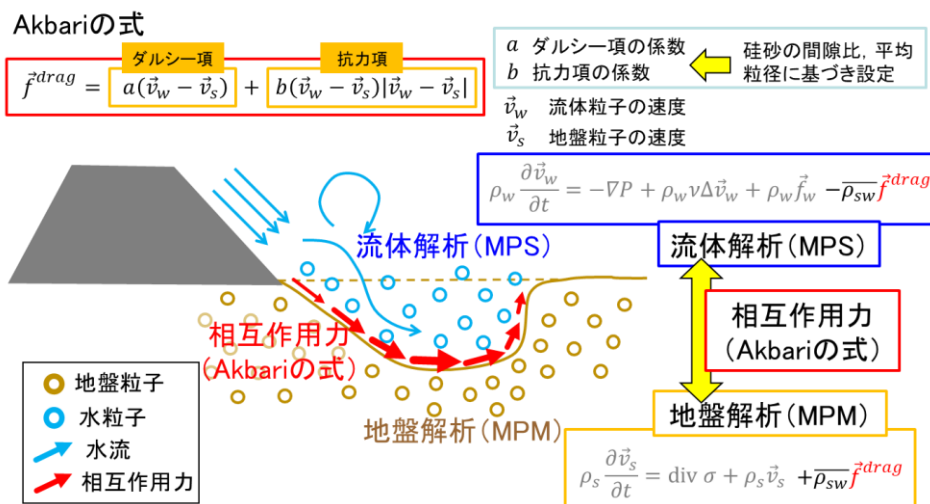


図1 MPM-MPS 連成解析手法の概要

Akbari の式⁽³⁾を用いて土と水の間の相互作用力を求め、MPMを用いてその相互作用力により土の変形を解析する手法を構築した。さらに、MPSにおいて、土と水の間の相互作用力と土の変形に伴い水の流れが更新される手法を構築し、これらの手法を繰り返し実施することで、水の流れの変化に伴い土が洗掘される現象を時々刻々解析する手法を開発した。

4. 研究成果

4. 1. 越流解析の結果

盛土模型に対する越流実験⁽⁴⁾の再現解析を実施し、越流解析の妥当性確認を行った。図2に越流実験の概要と実験結果と解析結果の比較を示す。実験装置は、独立行政法人 農村工学研究所が所有する造波水路実験施設を利用し、高さ0.4mの剛体盛土模型を越流する実験を行った。実験装置は、全長63m幅0.8mの水路で、海側端部から20mの地点にゲートが設けてあり、前浜水位とゲート内水位を調整することで発生させる津波の波形を変化させることができる構造となっている。実験結果から、ゲート内水位を1.28mとした場合、盛土模型を越流する際に非碎波となり、ゲート内水位を1.48mとした場合、盛土模型を越流する際に非碎波となった。本研究では、非碎波になるゲート内水位を1.28mとした場合をCase1とし、碎波になるゲート内水位を1.48mとした場合をCase2とし、実験と解析を比較する。解析の妥当性確認のために、測定地点AとBで波高を、流速の測定地点Cで盛土模型の接線方向流速を測定した。

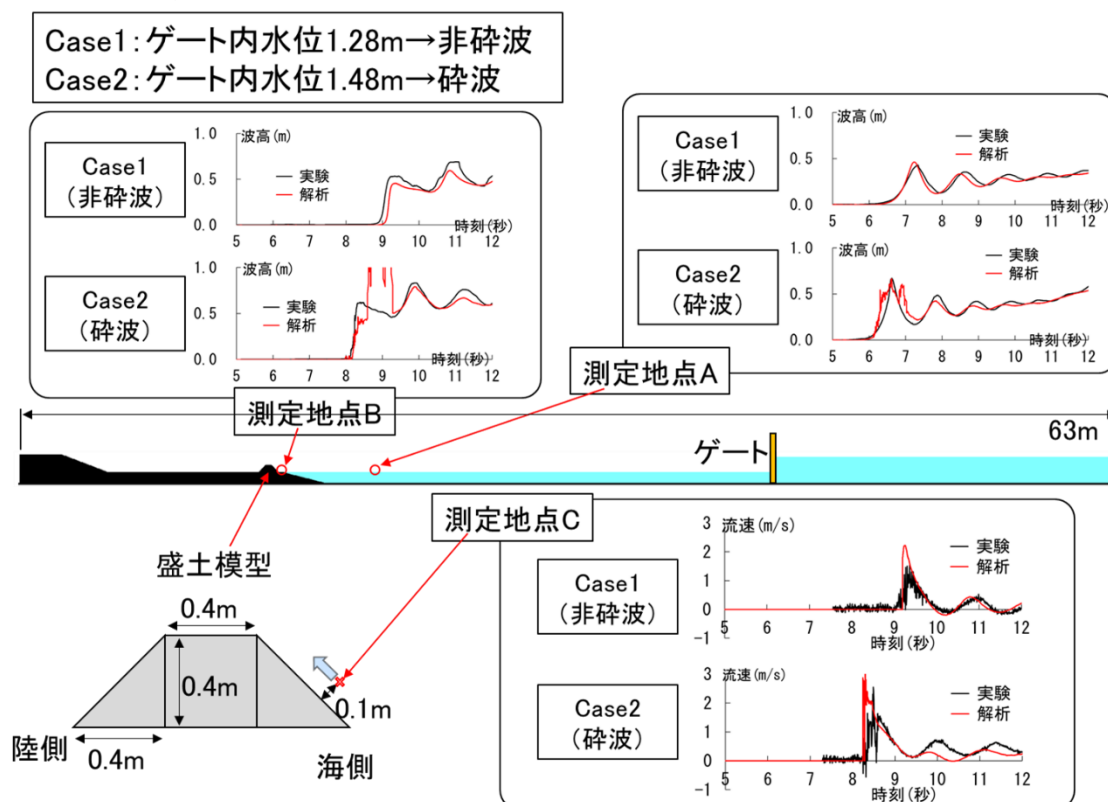


図2 越流解析の概要と実験結果と解析結果の比較

図3は、非碎波の場合であるCase1の盛土模型付近の波形を比較した結果であり、図4は、碎波である場合のCase2の盛土模型付近の波形を比較した結果である。非碎波の場合であるCase1の場合を比較してみる。図3から、盛土模型付近の波形は、実験写真と解析結果で非常に類似している。図2から、水路の平坦な部分を波が進行している測定地点Aでは、実験と解析の波高は非常に類似している。波が海底スロープを駆け上がった後の測定地点Bでは、解析の波高が実験に比べて少し低い結果になっている。波が盛土模型を駆け上がり始める場所である測定地点Cでは、波が盛土模型に衝突した直後の流速に差が見られるが、それ以降は、類似した結果になっている。これらの結果から、Case1の場合は、解析結果は実験をよく再現しているといえる。

次に、碎波の場合であるCase2の場合を比較してみる。図4から、盛土模型付近の波形は、飛沫の様子まで含めて、実験写真と解析結果で非常に類似している。測定地点Aでは、時刻6s~7sの間、解析の波高に振動が発生している。この波高の振動は、進行する波の表面上を飛跳ねる微少な飛沫を測定してしまった結果である。それ以外の時刻では、実験と解析の波高は類似している。測定地点Bでは、時刻8s~9.2sの間、解析の波高が大きく高い結果になっている。解析では、全ての飛沫を観測してしまうため、このような結果になる。それ以外の時刻では、実験と解析の波高は類似している。測定地点Cでは、波が盛土模型に衝突した直後の時刻8.3s~8.5sの間は、解析の方が、流速が大きくなっているが、その後、徐々に解析の方で流速が減衰している様子がみられる。

これらの結果から、Case2の場合は、飛沫が発生しているところでの妥当性確認は、図4の実

験写真と解析結果を目視で比較して類似することを確認する程度であるが、それ以降は、解析での減衰が大きいものの、解析結果は実験を再現しているといえる。



図3 Case1 の盛土模型付近の波形(非碎波)の比較(粒子の色は流速)

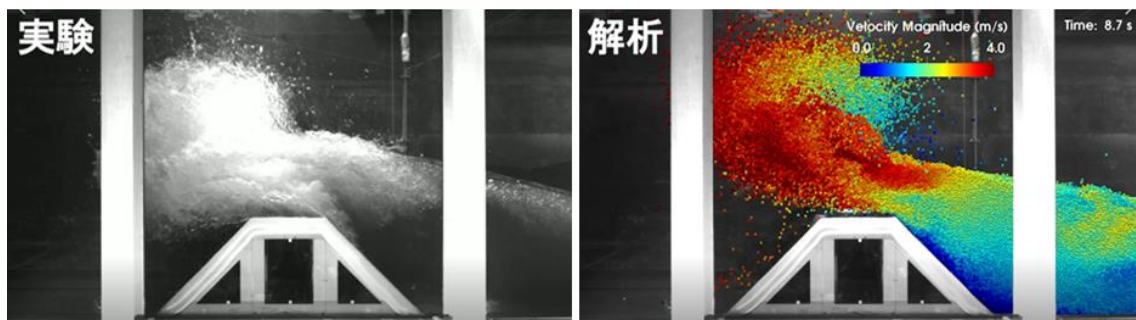


図4 Case2 の盛土模型付近の波形(碎波)の比較(粒子の色は流速)

4. 2. 洗掘解析の結果

盛土模型に対する洗掘実験⁽⁵⁾の再現解析を実施した。本実験模型の概要を図5に示す。実験模型は、補強盛土、支持地盤からなり、左側から右側への一方向の流水を受けた際の支持地盤の洗掘挙動について検討している。支持地盤については細粒分を含んだベントナイト混合砂砂を用いている。支持地盤の粘着力86.8(kPa)および内部摩擦角30.9(度)は、この地盤試料と類似した配合を有する試料(配合率、砂砂6号:砂砂8号:ベントナイト=50:50:1(重量比)、含水比 $w=15.0\%$ 、湿潤密度:1.57(g/cm³))で実施した三軸圧縮試験(CUB試験)より得られたものであ

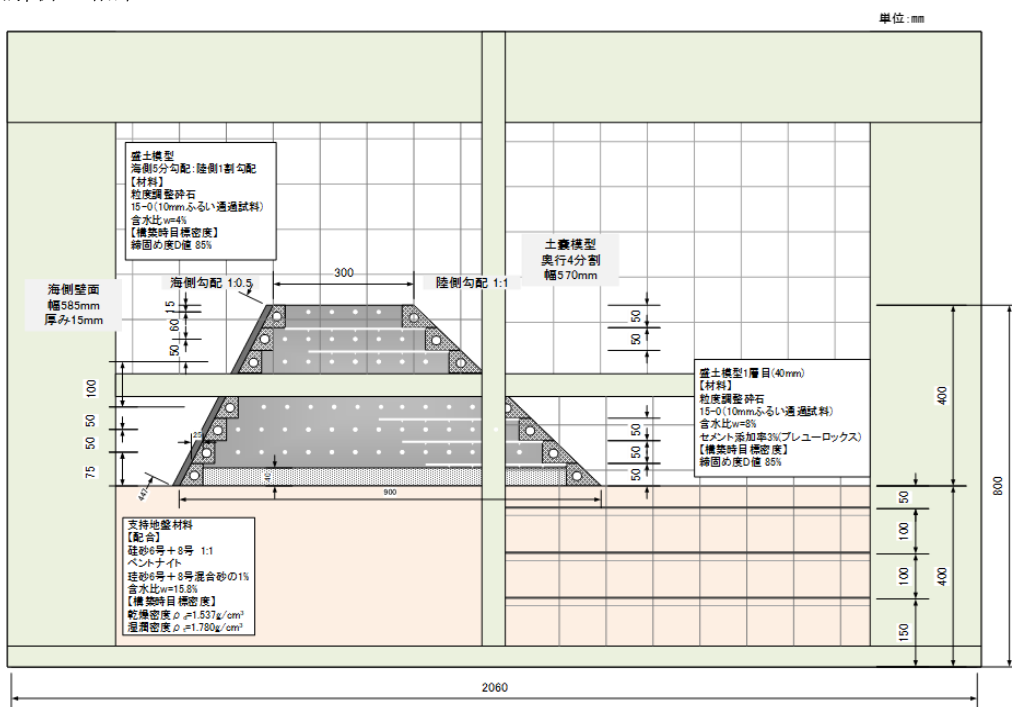


図5 補強盛土の洗掘実験模型の概要

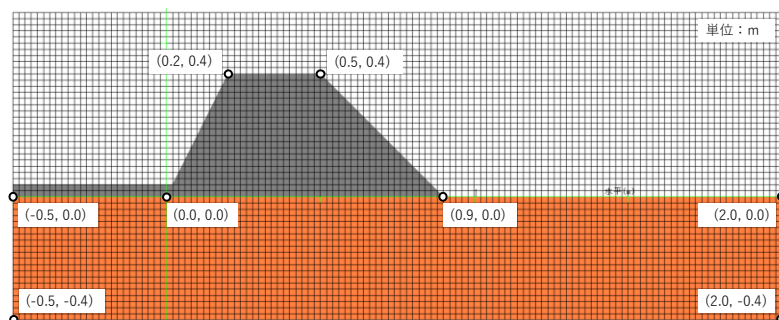


図6 洗掘実験の解析モデル

る。なお、鉄道盛土の粘着力および内部摩擦角については、支持地盤に比べ強度が大きいため、解析上、弾性体でモデル化した。

前述したように、水の挙動はMPSによりモデル化し、支持地盤および盛土はMPMでモデル化した。図6に解析モデルを示す。水については、MPS粒子が左側境界から進入し、右側境界へ抜けていくようにモデル化し、左側から右側への一方向の流れを表現した。MPS粒子は、ナビエーストークスの式に従った挙動をし、動粘性係数は $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ に設定した。支持地盤および盛土については、ともにMPMでモデル化し、左端は固定境界、右端および下端はMPM粒子が境界を越えた時点で粒子を削除するようにした。このような境界を設定することで、右端および下端は無限に連続した状態を表現している。支持地盤の構成則として、Drucker-Pragerモデルを降伏曲面とする弾完全塑性モデルを適用し、盛土は弾性体でモデル化した。支持地盤の粘着力、内部摩擦角は実験値を適用し、変形係数は $5.0 \times 10^3 \text{ (kPa)}$ に設定した。盛土部分の変形係数は、強度が大きいことを踏まえ $2.0 \times 10^4 \text{ (kPa)}$ に設定した。また、模型実験において、左端から盛土までの支持地盤の地表面にアルミ板を敷設していたことを踏まえ、変形係数 $2.0 \times 10^4 \text{ (kPa)}$ の弾性体粒子を配置した。背面格子長さは 0.020 m 、粒子の直径は 0.010 m に設定した。水と土の相互作用力については、前述したAkbari式を適用し、定数a, bについては、けい砂6号および8号が主流であることを踏まえ、前述したけい砂6号における定数 ($a=388, b=4630$) を用いた。

図7, 8に、実験結果と解析結果（水の流速と地盤内の最大せん断ひずみ分布）を示す。水の流速は、盛土天端から落水する際に最大となり、その後支持地盤と衝突することで減速している。支持地盤が洗掘されるに従い、洗掘形状に沿った流れが発生し、終局時では、洗掘された支持地盤に衝突した水が跳ね返り、渦状の流れが生じている。これらの挙動は、実験において目視で観察された挙動と概ね類似したものである。

地盤内の最大せん断ひずみ分布に着目すると、せん断ひずみが集中した破壊面が見られる。その後、この破壊面に沿って地盤が変位するとともに、支持地盤表面が浸食され、剥離していくに従い、地盤内の拘束圧が低下し、それに伴い地盤強度も低下し、洗掘がより一層進行しているものと考えられる。地盤の変形状況や、地盤と水の間の相互作用力に関する定量的評価は今後の課題であるが、概ね実験で見られた洗掘状況を再現できた。

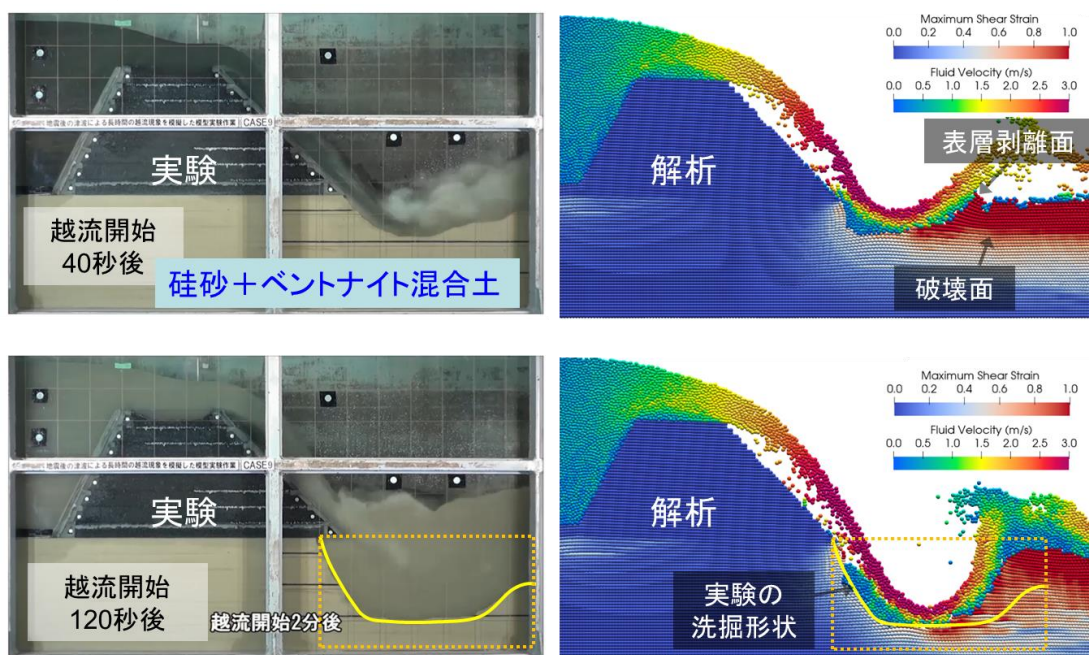


図7 洗掘実験と洗掘解析の結果

<引用文献>

- (1) 後藤仁志, 鶴田修己, 原田英治, 五十里洋行, 久保田博貴: 固液混相流解析のための DEM-MPS 連成手法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_021-I-025, 2012.
- (2) 岩本哲也: 沿岸構造物を対象とした粒子法による地震津波被害の評価に関する研究, 京都大学博士論文, 2017.
- (3) H. Akbari: Modified moving particle method for modeling wave interaction with multi layered porous structures, Coastal Engineering, Vol. 89, pp. 1-19, 2014.
- (4) 野中隆博, 渡辺健治, 松浦光佑, 工藤敦弘, 毛利栄征, 松島健一, 田村幸彦, 飯島正敏: 津波による盛土のり面周辺に作用する揚圧力の評価, 第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, pp. 516, 2014.
- (5) 渡辺健治, 中島進, 藤井公博, 工藤敦弘, 松浦光佑: 粘り強い鉄道盛土構造で大地震と長時間の津波越流に耐える, 鉄道総研レビュー, Vol. 73, No. 3, pp. 24-27, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 室谷浩平, 中出 孝次, 鎌田 慈	4. 巻 早期公開
2. 論文標題 鉄道車両に対する着雪シミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 HPCI利用研究成果集	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈, 高橋大	4. 巻 Vol.77 No.4
2. 論文標題 高速車両の台車周りの着雪を予測する	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鉄道総研レビュー	6. 最初と最後の頁 20-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakajima, S., Abe, K., Shinoda, M., Nakamura, S., Nakamura, H. and Chigira, K.	4. 巻 Vol. 59, No.6
2. 論文標題 Dynamic centrifuge model tests and material point method analysis of the impact force of a sliding soil mass caused by earthquake-induced slope failure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1813-1829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2019.08.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 阿部慶太, 野本将太, 池本宏文, 高崎秀明, 佐名川太亮	4. 巻 75巻 4号
2. 論文標題 MPMを用いた橋台の地震時変形性能に関する解析的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 I_273-I_284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.75.1_273	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei MUROTANI	4. 巻 Vol.60, No.1
2. 論文標題 Kohei MUROTANI, Large Scale Numerical Simulation Reproducing of Tsunami Behavior against a Station Building	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Quarterly Report of RTRI	6. 最初と最後の頁 58-64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2219/rtriqr.60.1_58	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 室谷浩平	4. 巻 Vol.32, No.6
2. 論文標題 大規模数値解析による鉄道駅舎に対する津波挙動の再現	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 鉄道総研報告	6. 最初と最後の頁 47-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 室谷浩平	4. 巻 1月号
2. 論文標題 粒子法による鉄道を対象とした解析への取り組みとその可視化例	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 可視化情報学会誌	6. 最初と最後の頁 12-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3154/jvs.39.152_12	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 室谷浩平	4. 巻 Vol.75 No.11
2. 論文標題 津波による鉄道構造物への負荷を予測する	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 鉄道総研レビュー	6. 最初と最後の頁 24-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 室谷浩平	4. 巻 Vol.60, No.8
2. 論文標題 粒子法による大規模津波解析と鉄道を対象とした解析への取り組み	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本原子力学会誌	6. 最初と最後の頁 47-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 阿部慶太, 室谷浩平, 渡邊健治
2. 発表標題 MPM-MPS連成解析手法の開発と盛土に対する津波越流・洗掘解析
3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 室谷浩平
2. 発表標題 粒子ベースシミュレーションの 工学的問題への適用事例
3. 学会等名 統合マクロ計算手法開発チームの研究セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Murotani, Koji Nakade, Yasushi Kamata, Daisuke Takahashi
2. 発表標題 Numerical Analysis of Snow Accretion by Airflow Simulator and Particle Simulator
3. 学会等名 12th World Congress on Railway Research (WCRR 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 室谷浩平
2. 発表標題 鉄道車両に対する着雪シミュレーション
3. 学会等名 スーパーコンピュータ・ソリューションセミナー2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈, 高橋大介, 根本征樹
2. 発表標題 降雪風洞と連携した着雪シミュレータの開発
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Abe, K., Ikemoto, H., and Nomoto, S.
2. 発表標題 Numerical study on relationship between inertia and seismic earth thrust acting on an abutment
3. 学会等名 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (16ARC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊健治, 佐名川太亮, 高柳剛
2. 発表標題 豪雨時における河川橋脚基礎の洗掘問題と他分野とのコラボレーション
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Murotani, Koji Nakade, Yasushi Kamata, Daisuke Takahashi
2. 発表標題 Development of Numerical Coupled Analysis Method by Air Flow Analysis and Snow Accretion Analysis
3. 学会等名 SC18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 室谷浩平
2. 発表標題 粒子法による流体解析 ~入門から応用~
3. 学会等名 産応協スクール2018・夏 特別講演 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 室谷浩平
2. 発表標題 降雪風洞試験と連携した、空気流シミュレータと粒子シミュレータによる着雪シミュレータの開発
3. 学会等名 第2回CAEワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 室谷浩平
2. 発表標題 粒子法のためのポリゴンと粒子の混合境界表現
3. 学会等名 共同利用・共同研究拠点 MIMS 現象数理学拠点 共同研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 室谷浩平
2. 発表標題 粒子法による流体解析のための粒子・ポリゴン境界表現の開発
3. 学会等名 日本応用数理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohei Murotani, Koji Nakade, Yasushi Kamata
2. 発表標題 Numerical Simulation of Snow Accretion by Airflow Simulator and Particle Simulator
3. 学会等名 SC17 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 室谷浩平, 高垣昌和
2. 発表標題 MPS法を用いた鉄道構造物に対する津波波圧による構造解析
3. 学会等名 第22回計算工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 室谷浩平, 高垣昌和, 林雅江
2. 発表標題 車輪・レール間の流体挙動解析のためのポリゴン境界表現を用いた有限要素法と粒子法の連成手法の開発
3. 学会等名 日本機械学会 2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Koshizuka, Y. Nannichi, Z. Wang, K. Murotani, K. Shibata, E. Nagai, T. Fujisawa and A. Anju
2. 発表標題 Three-dimensional Flooding Analysis in a Building by Tsunami Run-up Using Explicit MPS Method
3. 学会等名 2nd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈
2. 発表標題 空気流シミュレータと粒子シミュレータによる着雪解析
3. 学会等名 日本機械学会 第26回 交通・物流部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 室谷浩平
2. 発表標題 粒子法による大規模津波解析と鉄道を対象とした解析への取り組み
3. 学会等名 日本原子力学会 2017年秋の大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 室谷浩平
2. 発表標題 粒子シミュレーションへの幾何アルゴリズムの応用
3. 学会等名 幾何的数値モデル・アルゴリズムに関する研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 室谷浩平
2. 発表標題 鉄道と対象とした粒子シミュレーションの取り組み
3. 学会等名 粒子法の並列化技術に関するフォーラム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高垣 昌和 (Takagaki Masakazu) (50334363)	公益財団法人鉄道総合技術研究所・鉄道力学研究部・上席研究員GL (82658)	
研究分担者	渡邊 健治 (Watanabe Kenji) (80425925)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	阿部 慶太 (Abe Keita) (10425928)	公益財団法人鉄道総合技術研究所・構造物技術研究部・主任研究員 (82658)	