

津波模型実験の再現に向けた 粒子法の利用に関する基礎検討

菊地 俊紀¹・菅波 慎吾²・丸山 喜久³・庄司 学⁴

¹学生会員 千葉大学博士前期課程 大学院融合理工学府（〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33）

E-mail: tk.toshi@chiba-u.jp

²非会員 東京都港湾局（元 千葉大学博士前期課程 大学院工学研究科）

³正会員 千葉大学准教授 大学院工学研究院（〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33）

E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

⁴正会員 筑波大学准教授 システム情報系（〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1）

E-mail: gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

本研究では、流体解析手法の一つである粒子法のうちMPS法を用いて、既往研究における津波水理実験の数値解析を行い、結果の再現性の検討を行うことを目的とした。複数の水理実験を対象とした数値解析を行い、それぞれの計算結果と実験結果の波高、流速、水平力、鉛直力の比較を行い、解析条件と結果の再現性に関する検討を行った。本研究の解析結果によると、粒子間距離を橋梁模型の大きさを目安として、桁長方向におよそ40個、高さ方向におよそ5個、床版幅方向におよそ20個程度が並ぶような大きさに設定すると良好な解析結果が得られた。一方、橋梁に作用する鉛直力の再現が難しい事例もあったため、今後さらなる検討を要する。

Key Words : Moving Particle Semi-implicit method ,Tsunami force, distance between the two particles

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋地震に伴う津波によって太平洋沿岸部に甚大な被害が発生した。とくに橋梁の流出被害は、被災地域の孤立や、救助活動や救援物資の輸送の遅延などの道路交通システムの機能障害を引き起こし、地震後の緊急対応活動に大きな影響を与えた。東北地方太平洋沖地震を受けて、2012年に道路橋示方書¹⁾が改定されたが、橋梁構造物の津波対策は、まだ確立されていないのが現状である。これまで津波が橋桁に与える影響に関する実験的研究^{2,3,4)}が行われてきた。橋梁の津波対策を検討するには、これらの津波模型実験が有効な手段の一つであるが、様々なパターンを検討するには数値解析による検討も不可欠である。つまり、数値解析によって橋梁に作用する流体力を評価し、橋梁の流出メカニズムを明らかにすることが重要である。

そこで本研究では、粒子法^{5,6)}を用いて橋梁の津波模型実験の結果を再現することを試みた。粒子法の代表的な手法としてはSPH（Smoothing Particle Hydrodynamics）法、MPS（Moving Particle Semi-implicit）法が挙げられる。SPH法では射影法に基づいた非圧縮性用のものを

Incompressible SPH 法（以下、ISPH 法）と呼ぶ。浅井ら⁷⁾はISPH法、MPS法、FEM、DEMによる流体衝撃力評価を行った。田邊ら⁸⁾は粒子法（ISPH法）を用いて小型の橋桁模型の水理実験との比較検証および、津波の形状の違いがもたらす桁に作用する流体力の影響について検討した。MPS法は、粒子間相互作用モデルを用いて流体の計算を行う手法である。とくに非圧縮性流体の解析において精度の良い結果を示し、水面の微妙な変化や飛び散る飛沫の発生なども結果として得ることができる。薄井ら⁹⁾はMPS法によって橋梁の流失シミュレーションを行い、津波による橋梁構造物の被災メカニズムの解明及び津波に対する橋梁構造物の被害軽減技術の検討を行った。2次元MPS法を用いた研究としては中尾ら¹⁰⁾や増田ら¹¹⁾による研究が挙げられる。また、後藤ら¹²⁾はMPS法を用いて、土砂粒子群で構成された護岸前面砂地盤が落下流の水撃により侵食される過程に関して数値シミュレーションを行った。さらに、五十里ら¹³⁾は、剛体構成粒子間および剛体構成粒子と壁粒子の間にはたらく力の計算に個別要素法の枠組みを導入するDEM-MPS法¹⁴⁾を用いて、津波による桁橋の被災過程に関するシミュレーションを実施した。そのほか、粒子法は津波を対象とした事例以

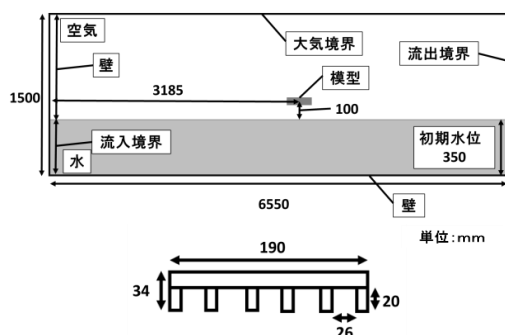


図-1 解析モデルの概要（上：水路模型 下：橋桁模型）

表-1 各ケースの粒子間距離と総粒子数

解析ケース	粒子間距離(mm)	総粒子数(個)
1	11	約135万
2	12	約106万
3	13	約80万
4	14	約65万

外に医療¹⁵⁾、船舶^{16,17)}、土木材料^{18,19)}、原子力²⁰⁾などの幅広い分野で注目されている。本研究では、MPS法に基づく流体解析ソフトウェアParticleworks²¹⁾を使用した。

本研究で対象とした模型実験は、土木学会地震工学委員会・橋梁の対津波設計に関する研究小委員会により公開されたベンチマークテスト用の実験結果²²⁾と、庄司ら²³⁾による津波模型実験である。橋梁の対津波設計に関する研究小委員会では、孤立波による橋桁への作用力（課題1）、直橋および斜橋に対する津波作用力（課題2）の実験結果を公開しており²²⁾、本研究ではこれらを解析対象とした。また、庄司ら²³⁾のドライベッド上の遡上波を模擬し、橋梁模型に作用する津波の再現性を検討する。それぞれの実験において、粒子法に基づく数値解析を行い、解析条件と推定精度の関係を評価した。

2. 孤立波による橋桁への作用力の推定

橋梁の対津波設計に関する研究小委員会の孤立波による橋桁への作用力（課題1）²²⁾に基づき、AutoCADで実験水路および橋桁模型を作成し、Particleworksの解析用モデル（図-1）とした。橋梁模型の桁長方向（紙面直角方向）は、400 mmである。実験水路は全長約27 mで造波板により波を模擬している²²⁾が、水路全体をモデル化すると計算時間が膨大になるものと予想されたため、本研究の解析モデルでは全長6.55 mとし、流入境界からの粒子の流入により波を再現した。解析領域における水路幅は800 mm、初期水位は350 mmである。孤立波は、流入境界から上限体積0.24 m³、流入速度1.1 m/sで波を流入させることで再現した。解析時間刻みは 5×10^{-4} s、計算結果

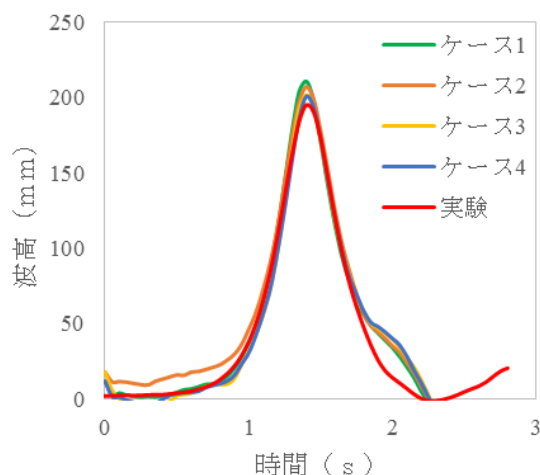


図-2 ベンチマークテスト課題1の実験結果²²⁾と解析結果の波高の比較

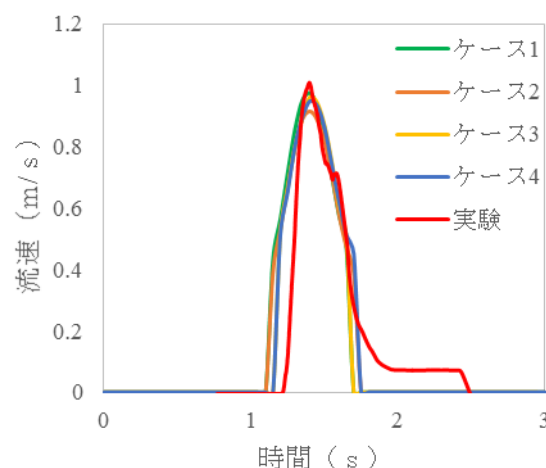


図-3 ベンチマークテスト課題1の実験結果²²⁾と解析結果の流速の比較

の出力間隔は0.05 sとし、実時間3 sの解析を行った。

表-1に示すように粒子間距離を4通り仮定（ケース1～ケース4）し、それぞれの波高、流速、水平力、鉛直力を実験結果と比較した。格子幅は各ケースの粒子間距離と同じにした。波高は高さ方向の最大値とし、橋桁模型の桁長方向および床版幅方向の中心から流入口側に500 mmの位置で測定した。流速計は縦50 mm、横50 mm、奥行き20 mmの直方体を計測領域として設定した。領域を通過する粒子の流下方向の平均速度を流速とし、橋桁模型中心から流入口側に500 mmの位置で測定した。解析と実験の波高計および流速計の測定結果を図-2、図-3に示す。なお、実験結果との比較の際には、ピークが同時刻に発現されるように実験結果の時刻歴を平行移動させた。各ケースの波高と流速のピーク値および時間変化に大きな違いはなく、いずれも実験結果を精度よく再現できている。

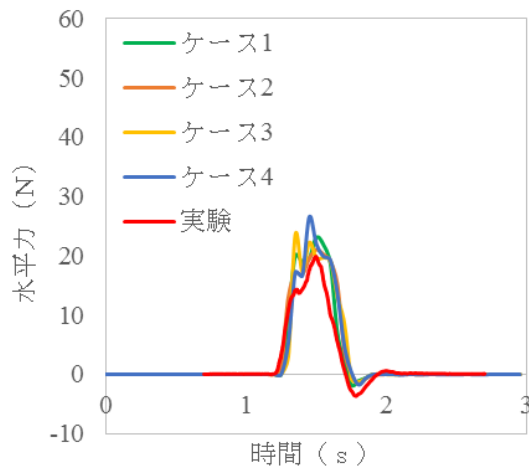


図-4 ベンチマークテスト課題1の実験結果²⁹⁾と解析結果の水平力の比較

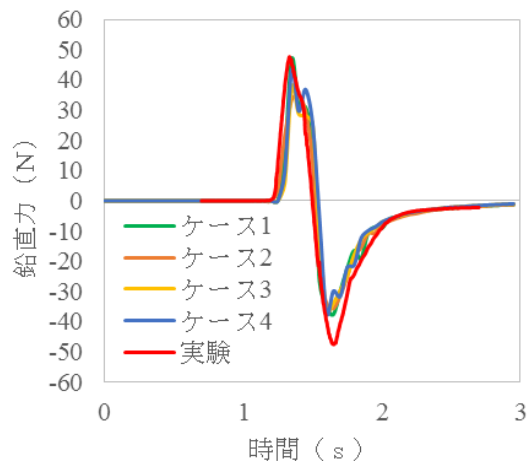


図-5 ベンチマークテスト課題1の実験結果²⁹⁾と解析結果の鉛直力の比較

次に橋桁に作用する水平力と鉛直力の時刻歴波形を図-4、図-5にそれぞれ示す。作用力の向きは、水平力は流下方向を正とし、鉛直力は上方向を正とした。作用力の算定式は、圧力項、粘性項、表面張力項、および外力項から成り、橋梁モデルの近傍粒子の総和として算出されるが、本研究では粘性および表面張力の影響は考慮していない²⁴⁾。

図-4によると、実験では1.4 sで14.3 Nと1.5 sで19.9 Nの二つのピークの値があり、二つ目のピークの方が大きい。解析結果と比較すると、ケース1とケース2の水平力は実験結果と同じような時間変化を示している。ケース1では1.4 sで20.1 Nと1.5 sで23.1 Nのピーク値を示し、ケース2では1.4 sで17.0 Nと1.5 sで21.0 Nの水平力のピークを示した。ケース3とケース4は、水平力の最大値が実験よりも早く発現されるなど、時間変化が異なっている。このことから、水平力の比較ではケース1とケース2の再現性が高いと考えられる。

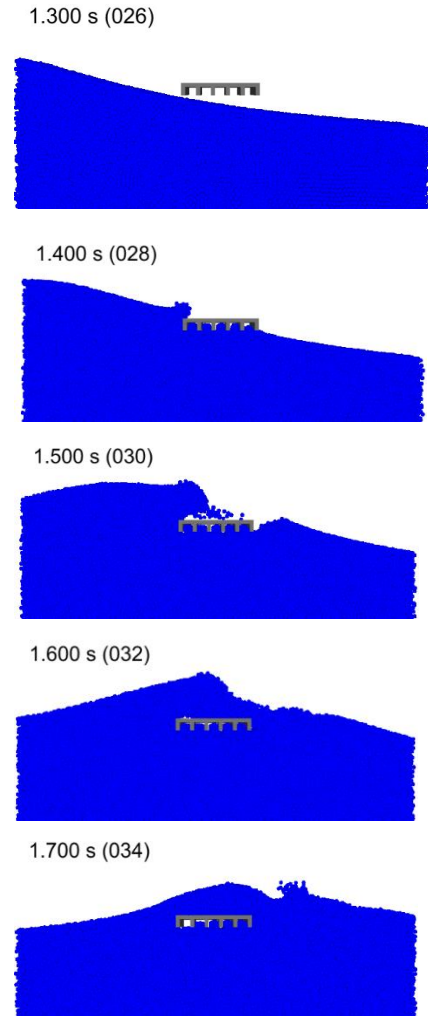


図-6 橋梁周辺の流況（ケース1）

図-5によると、実験の鉛直力の最大値は1.3 sで47.7 N、負圧が1.7 sで最大（-47.5 N）となった。解析結果を比較すると、最大値に関してはケース1（1.4 sで47.0 N）、ケース4（1.4 sで43.2 N）の再現性が高い。負圧の最大値は全てのケースで-37 N程度の値となった。また、ケース4の負圧の時間変化がやや異なっていることがわかる。このことから、鉛直力の比較ではケース1の再現性が高いと考えられる。図-6にケース1の計算結果における橋梁周辺の流況を示す。なお、橋桁を見やすくするため紙面手前側の粒子は表示していない。

3. 直橋および斜橋に対する津波作用力の推定

橋梁の対津波設計に関する研究小委員会の直橋および斜橋に対する津波作用力（課題2）²⁹⁾に基づき、AutoCADで実験水路（図-7）、橋桁模型（図-8、図-9）を作成し、Particleworksの解析用モデルとした。解析領域における水路幅は196 mm、初期水位は貯水部で150 mm、模型側では20 mmである。解析時間刻みは 5×10^{-4}

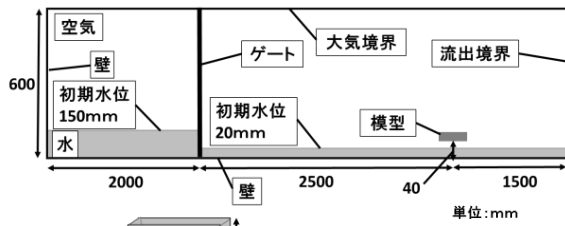


図-7 解析モデルの概要
(上：水路全体図 下：ゲート部詳細)

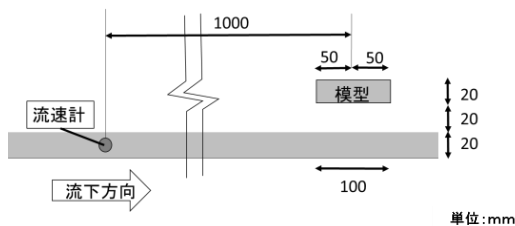


図-8 橋梁模型の側面図

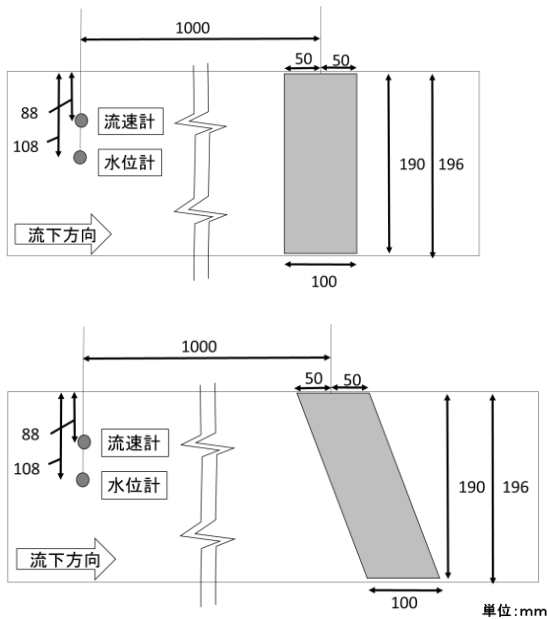


図-9 橋梁模型の平面図
(上：直橋模型 下：斜橋模型)

s, 計算結果の出力間隔は0.05sとし、実時間5sの解析を行った。

表-2に示すように4通りの粒子間距離を仮定し、水位、流速、水平力、鉛直力について、解析結果と実験結果の比較を行った。なお、格子幅は各ケースの粒子間距離と同じである。水位は高さ方向の最大値とし、水位計は図-9に示す位置に設定した。流速計は縦40mm、横40mm、奥行き20mmの直方体を計測領域として設定した。領域

表-2 各ケースの粒子間距離と総粒子数

解析ケース	粒子間距離 (mm)	総粒子 (個)
5	4	約123万
6	5	約60万
7	6	約33万
8	7	約23万

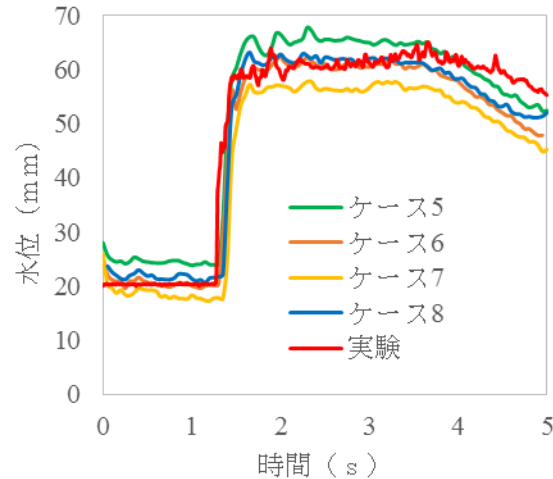


図-10 ベンチマークテスト課題2(直橋)の実験結果²⁾と解析結果の水位の比較

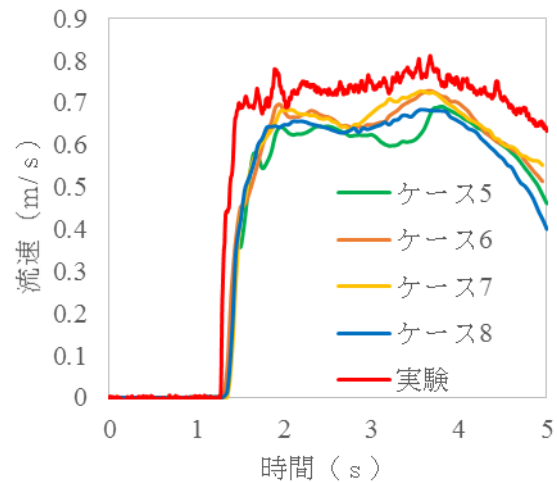


図-11 ベンチマークテスト課題2(直橋)の実験結果²⁾と解析結果の流速の比較

を通過する粒子の流下方向の平均速度とし、図-9に示す位置に設定した。

直橋に対する各ケースの解析結果と実験結果の水位計および流速計の測定結果を図-10、図-11に示す。図-10によると、時刻1.5s～3sでケース5の水位は実験結果よりも5mm程度高く、ケース7では5mm程度低かった。ケース6とケース8は、実験結果を精度良く再現できた。図-11によると、解析結果の流速は実験結果よりやや小さく、各ケースとも最大値が0.7m/s程度の値を示した。

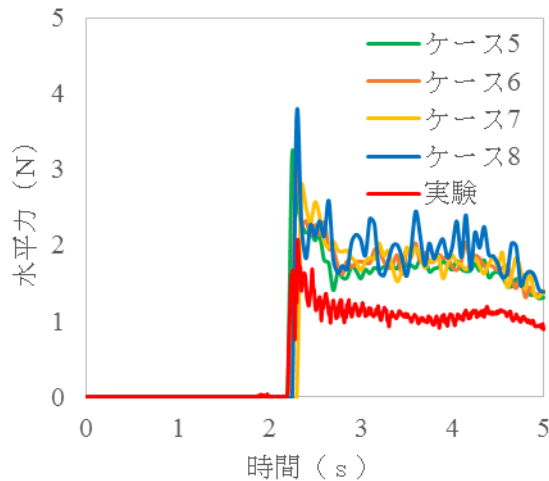


図-12 ベンチマークテスト課題2（直橋）の実験結果²⁾と解析結果の水平力の比較

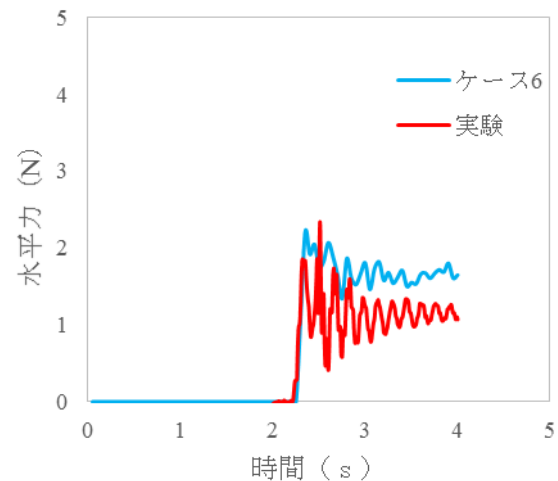


図-14 ベンチマークテスト課題2（斜橋）の実験結果²⁾と解析結果（ケース6）の水平力の比較

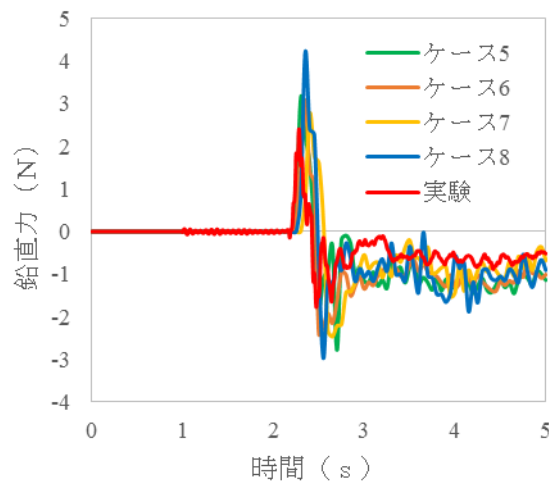


図-13 ベンチマークテスト課題2（直橋）の実験結果²⁾と解析結果の鉛直力の比較

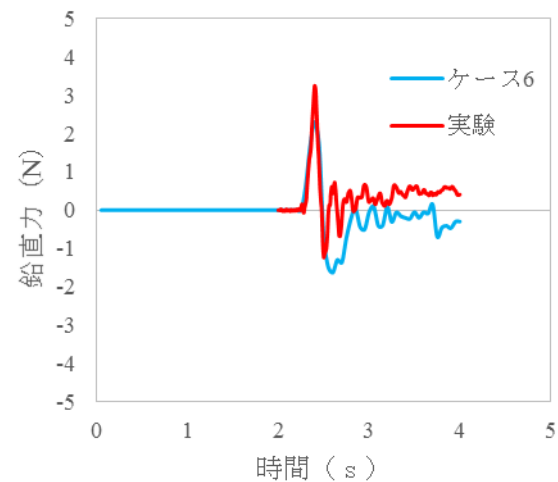


図-15 ベンチマークテスト課題2（斜橋）の実験結果²⁾と解析結果（ケース6）の鉛直力の比較

次に橋桁に作用する水平力と鉛直力の時刻歴波形を図-12、図-13に示す。作用力の向きは、水平力は流下方向を正とし、鉛直力は上方向を正とした。図-12によると、実験結果の水平力は波が橋梁に作用した直後に最大値（時刻2.31 sで2.06 N）に至り、その後は最大値の50～60%程度の値が作用し続けている。水平力の最大値を解析ケースごとに比較すると、ケース8が最も大きく（3.74 N）、ケース7が最小（2.78 N）となった。水平力の時間変動に関しては、ケース8は時刻3 s以降でも水平力が大きく振動している。そのほかのケースでは水平力の時間変動は小さいが、最大値の50～60%程度の水平力が作用し続けるのはケース5とケース6である。

図-13によると、実験の鉛直力の最大値は時刻2.28 sのとき2.39 Nで、負圧の最大値は時刻2.47 sのとき-1.76 Nである。解析結果では、ケース7の最大値（2.77 N）が実験

結果と最も近いが、作用する時刻（2.40 s）は最も精度が悪い。ケース8の最大値（4.21 N）は過大評価であり、ケース5（3.12 N）とケース6（3.09 N）は同程度の結果である。負圧に着目すると、ケース5とケース8の値がやや大きく、ケース5では他のケースよりも負圧の最大値が遅い時刻で再現された。

図-10～図-13の結果から、水平力が実験結果よりもやや大きいものの、総合的にはケース6が直橋の実験結果の再現に最も妥当なものと考えられる。そこで、斜橋模型に対する実験結果の再現を、ケース6の解析条件をもとに検討した。図-14に橋梁模型に作用する水平力、図-15に鉛直力を比較する。実験の水平力の時間変動は大きく、二つ目のピークが最大値（時刻2.51 sのときに2.34 N）となっている。その後、最大値の5割程度の値に収束している。解析結果では最大値が時刻2.35 sのときに2.21 N

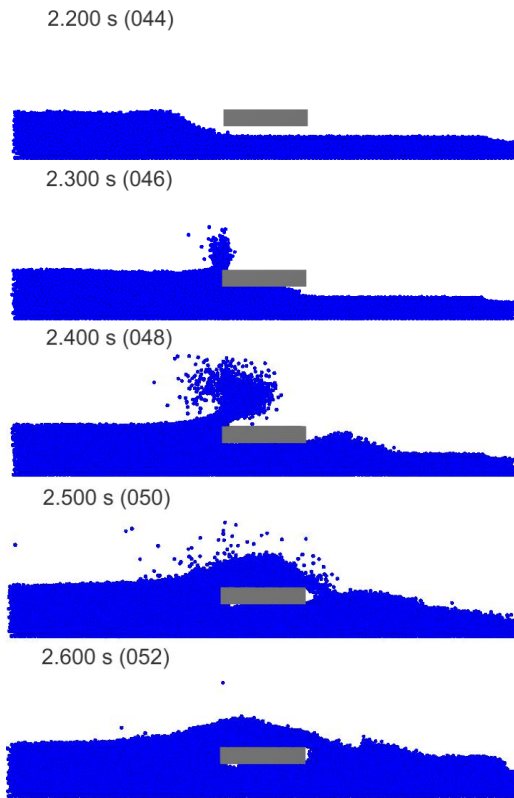


図-16 橋梁周辺の流況（直橋：ケース6）

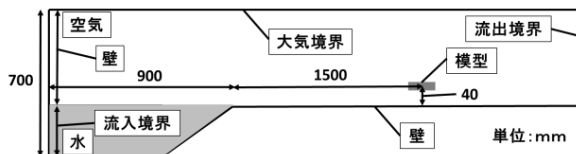


図-17 解析モデルの概要

となり、実験値の0.9倍となった。最大値の発現後は、7割程度の値に収束している。このように、直橋のときよりも斜橋の水平力のほうが精度良く再現できた。実験の鉛直力の最大値は時刻2.4 sで3.24 N、負圧の最大値は2.5 sで-1.22 Nである。解析では時刻2.40 sのとき最大値2.30 Nを示した。負圧の最大値は時刻2.60 sのとき-1.62 Nとなった。鉛直力は、概ね良好に再現することができた。図-16にケース6の計算結果（直橋）における橋梁周辺の流況を示す。なお、橋桁を見やすくするため紙面手前側の粒子を表示していない。

4. ドライベッド上の遡上波による津波作用力の推定

庄司ら²⁹⁾に基づき、AutoCADで解析用水路（図-17）および橋桁模型（図-18）を作成し、Particleworksの解析用モデルとした。橋桁模型は張出しを有するものと無いものの2種類あり、床版幅、床版高さ、および桁高は同じである。実験での貯水部は長さ3.0 mで、ゲートの開閉

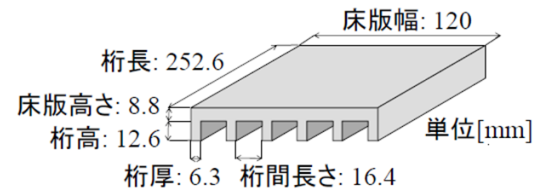
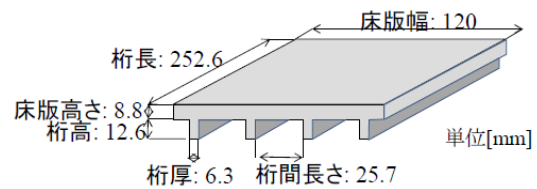


図-18 橋桁モデル²⁹⁾

（上：張出し有の模型 下：張出し無の模型）

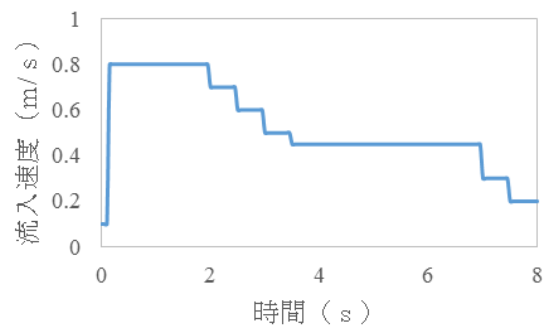


図-19 本研究で仮定した流入条件

表-3 各ケースの粒子間距離と格子幅、総粒子数

解析ケース	粒子間距離 (mm)	格子幅 (mm)	総粒子数 (個)
9	5	5	約 91 万
10	7	4	約 33 万
11	7	7	約 33 万
12	8	8	約 22 万

により波を模擬していた。しかし、水路全体をモデル化すると計算時間が膨大になるものと予想されたため、本研究の解析モデルでは貯水部の長さを0.9 mとし、流入境界からの粒子の流入により波を再現した。水路幅は貯水部で水路幅1000 mm。模型部で水路幅400 mmである。初期水位は貯水部で300 mmである。遡上波は、図-17の流入境界から粒子を図-19に示す流入条件で流入させることで再現した。流入口の最大速度よりも流速の計測領域の最大速度の方が大きくなると考えられたため、解析では実験で測定された最大値よりも低い0.8 m/sを最大とした。実験では水位のピークが1.5秒間ほど計測されていることから、流速0.8 m/sで粒子を約2秒間流入させ、その後は時間経過と共に徐々に減少させた。解析時刻刻みは 5×10^{-4} s、計算結果の出力間隔は0.05 sとし、実時間8 sの解析を行った。

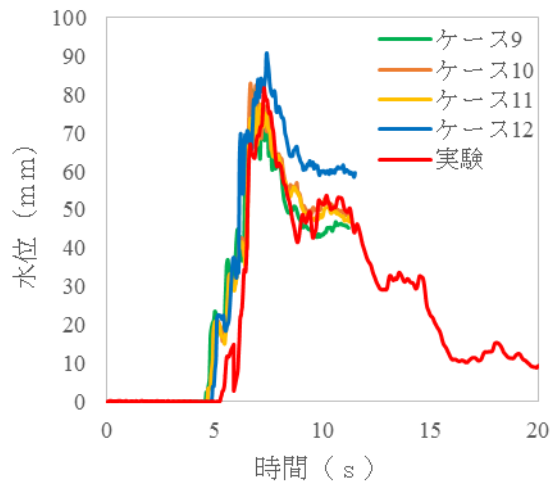


図-20 庄司らの実験結果²⁹⁾と解析結果の水位の比較（張出し有）

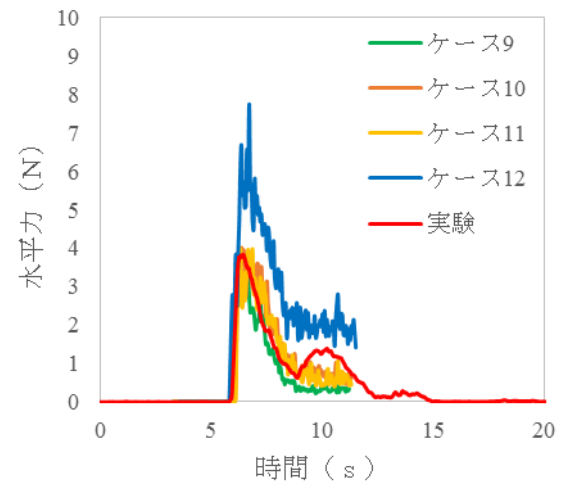


図-22 庄司らの実験結果²⁹⁾と解析結果の水平力の比較（張出し有）

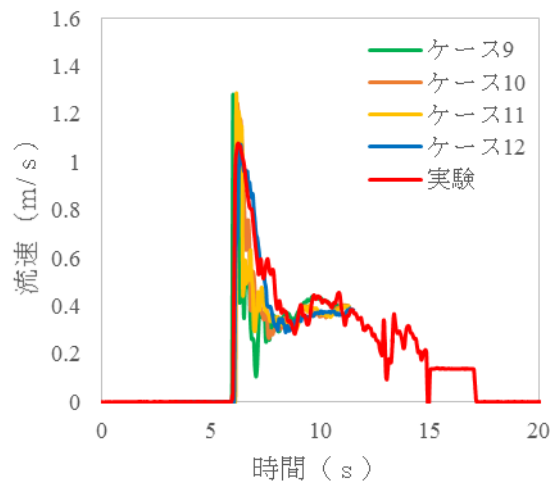


図-21 庄司らの実験結果²⁹⁾と解析結果の流速の比較（張出し有）

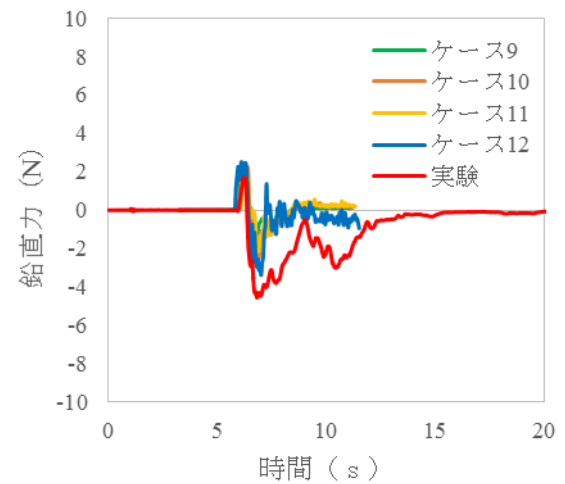


図-23 庄司らの実験結果²⁹⁾と解析結果の鉛直力の比較（張出し有）

まず、張出しを有する橋梁模型を対象として、表-3に示す4通りの粒子間距離と格子幅で解析を行い、水位、流速、水平力、鉛直力を実験結果と比較する。水位計は桁端から上流側に40 mmの位置に設定した。縦20 mm、横20 mm、奥行き20 mmの立方体を流速の計測領域として設定した。水位と流速の算出にあたり、橋梁模型に当たって跳ね返った粒子は極端に大きな値を示すため、除外した。解析と実験の水位、流速を図-20、図-21に比較する。なお、実験結果との比較に対しては、ピークが同時刻となるよう計算結果の時刻歴を平行移動させた。実験結果では水平力、鉛直力で複数回ピークが発現されるが、本解析では計算に要する時間を勘案して、一つ目のピークの再現性について検討を行う。

図-20によると、ケース12の水位の最大値は実験結果よりも10 mm程度大きい、その他のケースは実験結果

とほぼ一致した。図-21によると、ケース12の流速が実験結果と最も近い値を示し、その他のケースも実験結果を概ね再現できている。

次に橋桁に作用する水平力と鉛直力の時刻歴波形を図-22、図-23にそれぞれ示す。作用力の向きは、水平力の流下方向を正、鉛直力の上方向を正とした。実験の水平力は波が作用した直後に最大値となり、その後減少する（図-22）。最大値は時刻6.41 sのとき3.83 Nである。解析結果について考察すると、ケース12は明らかに過大評価、ケース9はやや過小評価である。ケース10とケース11の最大値はともに4.00 Nで精度が高いが、ケース11は短時間に2回ピークが発現している点の実験結果と異なっている。実験結果の鉛直力の最大値は1.71 Nで、負圧の最大値は-4.56 Nである。解析結果のケース12は負圧の最大値が発現された後の時間変動が大きく、鉛直力が正の値

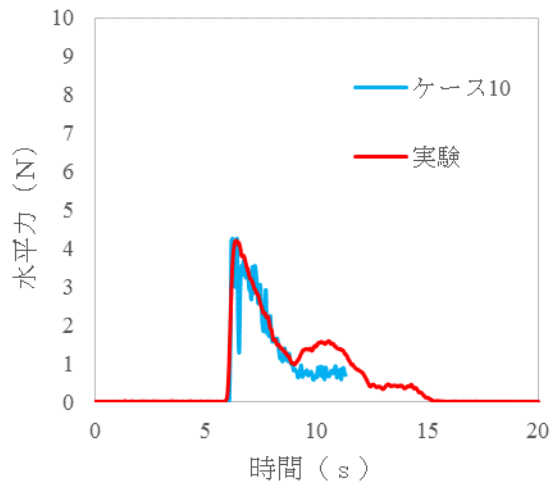


図-24 庄司らの実験結果²⁹⁾と解析結果の水平力の比較（張出し無）

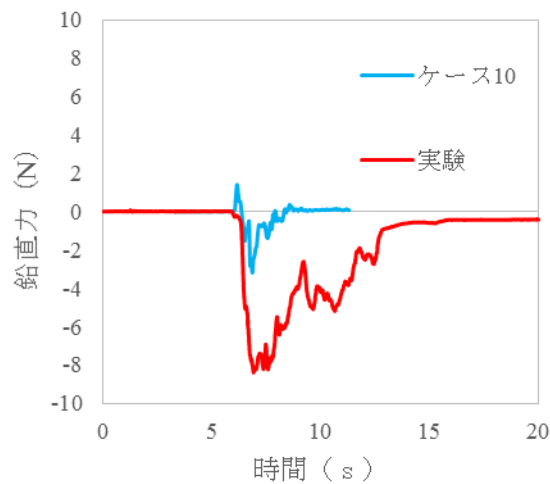


図-25 庄司らの実験結果²⁹⁾と解析結果の鉛直力の比較（張出し無）

を示すことがある点で実験と異なっている。その他のケースでは結果に大きな違いはない。また、本研究の解析環境（CPU：Intel Core i7-5820K(3.30GHz)、メモリ：64 GB）の下では、ケース10とケース11の解析時間は約31時間、ケース9は72時間以上を要した。

図-20～図-23の結果から、ケース10とケース11がほぼ同程度の再現性を示したものと考えられる。両者の粒子間距離は7mmで等しく、格子幅を4mm、7mmの2通りで設定している。このことから、解析結果に与える格子幅の影響はそれほど小さくなく、粒子間距離を適切に設定することが精度の向上を図る際には重要と思われる。

次に、張出し無の橋梁模型を用いた実験結果と解析結果の比較を行う。前述の張出しを有する橋梁模型を用いたときと同じ解析モデルを用い、橋梁模型の形状のみ張出し無の模型に取り替えた。また、粒子間距離と格子幅

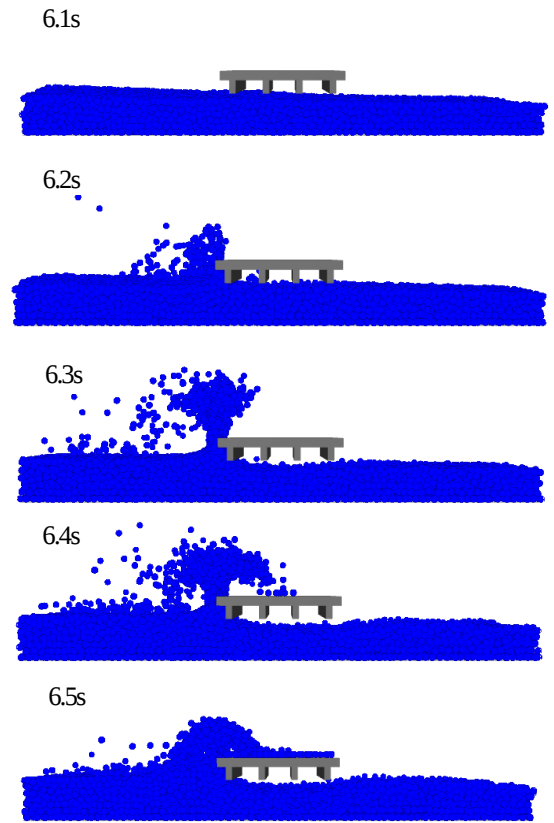


図-26 橋梁周辺の流況（張出し有：ケース10）

は表-3のケース10を仮定した。図-24に水平力の比較、図-25に鉛直力の比較を示す。水平力は、実験の最大値が4.20 Nに対し、解析の最大値は4.25Nとなり、再現性が高かった。一方、張出し無の橋梁模型の鉛直力の実験結果（図-25）は、張出し有の実験結果（図-23）と比べて、波の到達直後から下向きの力が作用している点と、下向きの力が2倍程度大きい点が特徴である。本研究の解析結果は、これらの2つの点を再現できておらず、今後の課題である。図-26にケース10の計算結果における橋梁周辺の流況を示す。橋桁を見やすくするため紙面手前側の粒子を表示していない。

5. 橋梁の津波作用力の再現に向けた粒子法の解析条件に関する考察

本研究で行った3つの模型実験に関する数値解析の結果、実験結果の再現性の高い解析ケースはケース1、ケース6、ケース10（またはケース11）となった。本研究で設定した解析ケースは、粒子間距離を何通りか変化させて設定したが、それぞれの模型実験について結果を精度良く再現した解析ケースの粒子間距離は、11 mm、5 mm、7 mmとなっている。また、解析に要した粒子数は、およそ135万、60万、33万個となっている。

本研究では、橋梁模型に作用する津波流体力を精度良

く再現することを主眼に解析結果を整理した。そこで、数値解析の精度が高かったケースの粒子間距離を橋梁模型の大きさと比較する。2章の橋梁模型は、桁長（紙面直角方向）400 mm、高さ34 mm、床版幅（紙面平行方向）190mmの大きさである。最も実験結果の再現精度が高かったケース1の粒子間距離は11 mmである。粒子が等間隔で均等に橋梁模型に作用した場合、橋梁模型には桁長方向に36個分、高さ方向に3個分、床版幅方向に17個分の粒子が作用する。3章の直橋の模型は、桁長190 mm、高さ20 mm、床版幅100mmである。粒子間距離5 mmの粒子が均等に橋梁模型に作用すると、桁長方向に38個分、高さ方向に4個分、床版幅方向に20個の大きさに相当する。4章の橋梁模型（張出し有）は、桁長252 mm、高さ21.4 mm、床版幅120mmの大きさである。粒子間距離が7 mmのとき、橋梁模型の大きさは桁長方向に36個分、高さ方向に3個分、床版幅方向に17個分に相当する。本研究の3つの解析事例を踏まえると、粒子間距離は橋梁模型の大きさに応じて設定することが望ましく、桁長方向におよそ40個、高さ方向におよそ5個、床版幅方向におよそ20個程度が並ぶような大きさとするのが望ましいように考えられる。これを結論づけるには、解析事例をさらに増やし、実験結果の再現精度を定量的に評価することが必要である。

6. 結論

本研究では、3つの橋梁の津波模型実験を対象として、粒子法（MPS法）に基づく数値シミュレーションを行った。実験結果と解析結果の波高、流速、および橋梁模型に作用する水平力、鉛直力を比較することで、数値解析による実験結果の再現性の検討を行った。粒子法に基づく数値解析では、粒子間距離、格子幅をいくつか仮定し、実験結果を最も精度よく再現する解析ケースを津波模型実験ごとに探索した。

本研究の結果としては、孤立波による橋桁への作用力の推定（2章）では、粒子間距離11 mmの結果の再現性が高かった。直橋および斜橋に対する津波作用力の推定（3章）では、粒子間距離5 mmの結果の再現性が高く、とくに直橋では実験の鉛直力を精度良く再現することができた。ドライベッド上の遡上波による津波作用力の推定（4章）では、粒子間距離7 mmのときの精度が高く、とくに水平力については実験結果を良好に再現した。一方、鉛直力の負圧に関しては精度が低かった。橋梁に作用する水平力や鉛直力を精度良く推定するためには、粒子間距離を橋梁模型の大きさを目安として、桁長方向におよそ40個、高さ方向におよそ5個、床版幅方向におよそ20個程度が並ぶような大きさに設定することが望ましいことが分かった。

今後は、既往の津波模型実験を対象とした解析をさら

に行い、粒子間距離と解析精度の関係を明らかにする。また、本研究の結果では、鉛直力の再現が難しい事例がいくつか見られた。鉛直力は、橋梁の津波による流出メカニズムに大きな影響を与える要因の一つであると考えられるため、詳細な検討を要する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、丸善、2012。
- 2) 片岡正次郎，日下部毅明，長屋和宏：津波衝突時に橋桁に作用する波力，第12回日本地震工学シンポジウム講演論文集，pp.154-157，2007。
- 3) 杉本健，運上茂樹：津波の橋梁の被害メカニズムに関する実験的研究，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.97-100，2008。
- 4) 張広鋒，中尾尚史，星隈順一：津波の影響を受ける橋の挙動に及ぼす上部構造の構造特性の影響に関する水路実験，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.97-102，2012。
- 5) 越塚誠一，柴田和也，室谷浩平：粒子法入門 流体シミュレーションの基礎から並列計算と可視化まで，丸善，2014。
- 6) 塚越誠一：粒子法による流れの数値解析，ながれ 21，pp.230-239，2002。
- 7) 浅井光輝，別府万寿博，石川信隆，眞鍋慶生，齊藤展，丹羽一邦：数値流体シミュレーションによる流体衝撃力評価に関する基礎的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.58A，pp.1021-1028，2012。
- 8) 田邊将一，浅井光輝，中尾尚史，伊津野和行：3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証，構造工学論文集 Vol.60A，土木学会，pp.293-302，2014。
- 9) 薄井稔弘，運上茂樹，杉本健：津波に対する道路橋の被害軽減に関する解析的検討，構造工学論文集，土木学会，Vol.56A，pp.464-473，2010。
- 10) 中尾尚史，伊津野和行，小林紘士：津波作用時における橋梁周辺の流れと流体力に関する基礎的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.55A，pp.789-798，2009。
- 11) 増田光弘，庄司邦昭，南清和，増田光一：MPS法を用いた津波中の浮体による衝突力に関する研究，日本航海学会論文集 Vol.124 pp.329-336，2011。
- 12) 後藤仁志，酒井哲郎，林稔，織田晃治，五十里洋行：遡上津波の戻り流れによる護岸法先洗掘のグリッドレス解析，海岸工学論文集，Vol.49，pp.46-50，2002。
- 13) 五十里洋行，後藤仁志：津波氾濫による桁橋被災過程の数値シミュレーション，海岸工学論文集，Vol.54，pp.211-215，2007。
- 14) 後藤仁志，林稔，安藤怜，鷺見崇，酒井哲郎：礫混合層を伴う混相流解析のためのDEM-MPS法マルチスケールリンクの開発，海岸工学論文集，第50巻，pp.26-30，2003。
- 15) 伊藤広貴，越塚誠一，志野亮作，芳賀昭弘，山下英臣，尾上剛士，中川恵一：放射線治療のための粒子法シミュレーションに基づく胸部Simulation-based 4DCTの構成，日本医用画像工学会学会誌，Vol.28，No.4，pp.229-236，2010。
- 16) 柴田和也，岡芳明，越塚誠一，谷澤克治：粒子法による3次元甲板冠水解析コードの開発，日本造船学会講演論文集，Vol.2，pp.59-60，2003。
- 17) 増田光弘，笹原裕太郎，南清和，増田光一：係留浮体の波浪中応答解析に対するMPS法の適用性に関する研究，日本航海学会論文集，Vol.127，pp.51-56，2012。
- 18) 入部綱清，伊良波繁雄，山田義智，富山潤：MPS法による粗骨材を考慮したフレッシュコンクリートの三次元流

- 動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No.1, pp. 1161-1166, 2004.
- 19) 浦野真次, 根本浩史, 崎原康平: 高流動コンクリートの充てん性評価への流動解析手法の適用に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 68, No.1, pp.38-48, 2012.
 - 20) 稲垣健太: 過酷事故シミュレーションへ向けたマルチフィジクス粒子法の開発, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 14, No. 4, pp.249-260, 2015.
 - 21) 藤澤智光: 粒子法と GPGPU でシミュレーションの新時代を切り開くプロメテック, 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.2, pp.181-185, 2011.
 - 22) 橋梁の対津波設計に関する研究小委員会: 対津波設計のベンチマークテストに関する論文集, 土木学会, 2016.
 - 23) 庄司学, 鳴原良典, 大伴行平: 橋桁に作用する津波波力のモデル化, 日本地震工学会論文集, Vol. 16, No. 8, pp. 88-109, 2016.
 - 24) 構造計画研究所 SBD 営業部: 粒子法ニュースレターサポートの車窓から～vol.21 パワー・トゥ・ザ・ポリゴン～ポリゴンに力を～, http://www.sbd.jp/product/netsu/particleworks/mail_magazine/backnumber/20160921_vol021.shtml#article3_top

FUNDAMENTAL STUDY ON THE USE OF MOVING PARTICLE SEMI-IMPLICIT METHOD TO ESTIMATE THE TSUNAMI FORCE ACTING ON BRIDGE GIRDER

Toshiki KIKUCHI, Shingo SUGANAMI, Yoshihisa MARUYAMA, and Gaku SHOJI

The authors conducted a series of numerical simulations to estimate the tsunami forces acting on bridge girder. The experimental results provided by the Earthquake Engineering Committee of Japan Society of Civil Engineers, and those performed by Shoji et al. (2016) were employed in this study to evaluate the accuracies of the numerical simulations. The wave height, wave velocity, and tsunami forces acting on bridge girders were selected to investigate the accuracy of the simulation. According to the comparisons between the experimental results and the analytical ones, the distance of the two particles should be set considering the size of bridge girder to obtain better results.