粒子法による津波波力と漂流物が土木構造物に与える影響の評価

Evaluation of the effects of tsunami force and floating objects on road bridges based on moving particle semi-implicit method

17WM1334 菊地 俊紀 Toshiki Kikuchi

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

The authors conducted a series of numerical simulations to estimate the tsunami forces acting on bridge girders. 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 compare with the results of the numerical simulations. The wave height, velocity, and 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 according to the size of bridge girder to obtain better results. Based on the above evaluation, numerical simulation of the hydraulic experiment on the drifting behavior of the submerged car performed by Onishi et al. (2014) was carried out.

1. はじめに

1982年に発生した長崎大水害や2011年に発生した東北地 方太平洋沖地震によって,都市域まで達しうる大規模な津 波・洪水氾濫が発生し,広範囲に甚大な被害が生じた.と くに東北地方太平洋沖地震における橋梁の流出被害は,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.また,多くの車両も浸水・ 漂流し,被害拡大に結びついている.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確立途上である.また,これまで津 波が橋桁および自動車に与える影響に関する実験的研究²⁻⁴⁾が行われてきた.津波対策を検討するには,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 析によって橋桁および自動車に作用する流体力を評価し, 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、流体解析手法の一つである粒子法 (MPS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. 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. 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7)と、庄司ら8)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)の実験結果 ⁷⁾と,直橋および斜橋に対する津波作用力(課題2)の実験 結果⁷⁾を公開しており、本研究ではこれらを解析対象とし た.また,庄司ら⁸⁾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. これらの実 験における数値解析の結果から,解析条件と推定精度の関 係を評価した. さらに、上記の解析条件と推定精度の関係

をもとに大西ら⁹⁾における河川氾濫時の水没車の漂流挙動 に関する水理実験の数値解析を行い,実験結果の再現を試 みた.なお本研究では,MPS法に基づく流体解析ソフトウ ェアParticleworks¹⁰⁾を使用した.

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)⁷⁾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.解析領域における水路幅は800 mm,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41 mで造波板により波を模擬している⁷⁾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.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.流体の密度は1000 kg/m³,動粘性係数 は1×10⁻⁶ m²/sとした.解析時間刻みは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 た.なお,格子幅は各ケースの粒子間距離と同じである.

橋桁に作用する水平力と鉛直力の時刻歴波形を図-2,図-3にそれぞれ示す.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.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、式(1)に表されるように、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.ここで、miは粒子iの質量、 ρ は流体の密度、Piは粒子iの圧力、 μ は粘性係数、uiは粒子iの流速、 ϕ は粒子iの表面自由エネルギー、 $a_{ext,i}$ は粒子iが受ける外力を表す.本研究では表面張力の影響は考慮していない¹¹⁾.



図-2 実験結果 7) と解析結果の水平力の比較

$$F = -\sum_{i} m_{i} \left(-\frac{1}{\rho} \nabla P_{i} + \mu \nabla^{2} u_{i} + \nabla \Phi_{i} + a_{ext,i} \right)$$
(1)

図-2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、ケース2およびケース3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24.2 N, 1.55 sで24.3 Nの二つのピーク値を示 し、ケース2では1.55 sのみピークとして現れたが、1.4 sで 15.8 Nと1.55 sで22.0 Nの水平力の値を示した.ケース3では 1.4 sで20.0 N, 1.5 sで22.9 Nの二つのピーク値を示した.ケ ース4は、水平力の最大値が実験よりも遅く発現され、ピー クの値が三つ表れるなど時間変化が異なっている.また, 負圧に関して実験の時間変化は1.8 sで-3.7 Nのピークの値 がある. 解析結果と比較するとケース1およびケース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1.8sで-1.9Nのピークの値を示し、ケース2では1.85 sで-1.38 Nのピークの値を示した.ケース3は1.8 sで1.7 Nの ピークが現れてい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、ケース2の再現性が高 いと考えられる.

図-3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49.6 N)の再現性が 高く、他のケースは33 N~36 N の値を示した.負圧の最 大値はケース4で-42.8 Nとなり、その他のケースでは-38 N ~-40 N値となった.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-4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.

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



図-4 橋梁周辺の流況(ケース1)

3. 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.

孤立波による橋桁への作用力(課題1)⁷⁾の推定に用いた 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) 190 mm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、直橋および斜橋に対する 津波作用力(課題2)の推定に用いた直橋模型は,桁長190 mm, 高さ20 mm, 床版幅100 mmである. 粒子間距離4 mm の粒子が均等に橋梁模型に作用すると桁長方向に48個分, 高さ方向に5個分,床版幅方向に25個分の大きさに相当する. 庄司ら⁸⁾によるドライベッド上の遡上波の作用力の推定に 用いた橋梁模型(張出し有)は, 桁長252 mm, 高さ21.4 mm, 床版幅120 mm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40~50個、高さ方 向におよそ5個,床版幅方向におよそ20~30個程度が並ぶよ うな大きさとすること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.



4. 車模型に作用する水平力の推定

大西ら⁹⁾の実験に基づき,AutoCAD で解析用水路(図-5) および車模型 A, B (図-6, 図-7) を作成し, Particleworks の解析用モデルとした. 車模型はセダン型小型自動車(1/16) を想定し,長さ 292.5 mm,幅 108 mm,高さ 90 mm とし, 車模型の前面が上流側となる向きで設置した.図-6の車模 型Aは相対水深(水深Hを自動車の高さkで除したもの) 0.33 および 0.56 の条件で用い、図-7 の車模型 B は相対水 深1.0の条件で用いた.実験での水路全長は10mだが、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水路全長を5mとし、 流入境界からの粒子の流入により流れを再現した.なお, 水路幅は400mmである. 粒子間距離および格子幅は6mm, 流体の密度は1000 kg/m³,動粘性係数は1×10⁻⁶ m²/s,クー ラン数を 0.2 とした. 解析時間刻みは 5×10-4 s, 計算結果 の出力間隔は 0.05 s とし、実時間 10 s の解析を行った. 各 相対水深で任意の流速を再現するため、流入速度、流入口 の高さ,初期水位を調整した13通りの条件を表-2に示す. 相対水深 0.56 はケース A~Fの6通り,相対水深 0.33 はケ ース G~Jの4通り,相対水深1.0 はケース K~Mの3通 りの条件である.

実験結果と解析結果の水平力の比較を図-8に示す.図-8

表-2 解析条件

	流入谏度	初期水位	流入口高さ
	(m/s)	(mm)	(mm)
ケースA	0.75	40	30
ケースB	1.10	30	30
ケースC	1.20	30	30
ケースD	1.05	25	45
ケースE	1.10	25	45
ケースF	1.00	15	55
ケースG	1.30	20	12
ケースH	1.20	20	20
ケースI	1.20	20	22
ケースJ	0.45	10	66
ケースK	0.30	75	90
ケースL	0.42	70	80
ケースM	0.60	65	80



図-9 車模型周辺流況 (ケースC, t=2.5s)

では実験結果を折れ線,解析結果を緑点として示し,横軸 に平均断面流速,縦軸に水平力をとっている.相対水深 0.56 の結果では,流速が小さい方から順にケース A から F とな っている.同様に相対水深 0.33 の結果では流速が小さい方 から順にケース G から J,相対水深 1.0 の結果では流速が 小さい方から順にケース K から M となっている.

水平力に関して,相対水深 0.56 の実験結果と解析結果の 比較を行うと,流速 30 cm/s付近では実験の水平力が約 0.5N に対し,解析結果(ケース A)では 0.75 N となり, 1.5 倍 程度の値となった.流速 50 cm/s から 60 cm/s において,実 験結果では水平力が約 0.8 N から約 2.5 N へと推移してい る.ケース B では 1.63 N,ケース C では 2.13 N と同程度 の値を示し,精度良く再現されている.流速 70 cm/s では 実験結果は 3.5 N 程度の値となっている.解析結果のケー ス D では流速 71.2 cm/s で水平力 2.95 N,ケース E では流 速 73.8 cm/s で水平力 3.27 N と水平力がやや小さい値とな っている.流速 90 cm/s では,実験では水平力が 4.5 N 程度 となっているが,解析結果(ケース F)では流速 90.2 cm/s で 3.93 N となり,やや小さい値となった.

次に相対水深0.33の流れに関しては,実験では流速50 cm/sで水平力が約0.9 Nとなり,流速60 cm/sでは水平力が約1.9 Nとなっている.解析結果のケースGでは流速52.6 cm/s で水平力0.79 N,ケースHでは流速56.7 cm/sで水平力0.98 N となり,いずれのケースも水平力がやや小さい値となった.実験結果の流速70 cm/sでは水平力が約2.2 N,流速80 cm/s では水平力が約2.1 Nとなっている.解析結果のケースIでは流速67.6 cm/sで水平力1.68 N,ケースJでは流速79.2 cm/s で水平力1.58 Nとなり,いずれのケースも水平力がやや小 さい値となった.

相対水深1.0の流れに関しては、実験では流速20 cm/s



で水平力0.3 N程度, 流速30 cm/sで水平力1 N程度となって いる. 解析結果 (ケースK) では流速25.7 cm/sで水平力が 2.63 Nとなり, 過大な結果となった.また,実験では流速40 cm/sで水平力2.8 N程度, 流速50 cm/sで水平力4.2 N程度と なっている.ケースLでは流速31.6 cm/sで水平力3.06 N, ケ ースMでは流速43.2 cm/sで水平力3.99 Nとなり, いずれの ケースも実験結果よりもやや過大な結果となった. 車模型 周辺の流況を図-9に示す.

5. 自動車模型の抗力係数の比較

次に車模型に作用する水平力F(N)をもとに式(2)を用 いて抗力係数Cpを求める.

$$\mathbf{F} = \mathbf{0.5}\rho C_D U_m^2 A_x \tag{2}$$

ここで、 ρは水の密度、Um は断面平均流速、Ax は x 方向 (流下方向)の自動車が水没している部分の投影面積であ る.図-10に実験結果と解析結果をもとに算出した抗力係 数 Co との比較を示す.横軸に相対水深 H/k,縦軸に抗力係 数をとっている.図中には大西ら⁹⁾の結果とともに、他の 研究の結果(吉川ら(2012),押川ら(2011),Humphries(2012)) が示されている.

実験では相対水深 0.56 付近で抗力係数は 2.4 程度の値と なっている. 解析結果の抗力係数はそれぞれケース A で 3.48, ケースBからEで2.70~2.87, ケースFで2.44とな り、とくにケースAの抗力係数が他のケースと比較して過 大な結果となった.各ケースの平均は2.84となり、実験結 果よりも0.4程度大きい結果となった.ケースAの水平力 の値は実験よりも 1.5 倍程度の値となっているため、抗力 係数もとくに大きい値となった.相対水深 0.3 付近の実験 の抗力係数は 2.8 程度の値となっている. 解析結果(ケー スGからJ)では抗力係数が2.64~2.74の値となり、各ケ ースで同程度の結果が得られた. 各ケースの平均は 2.69 と なり、実験結果よりもやや低い値となったが、再現性が高 い結果となった.相対水深 1.0 付近の実験の抗力係数は 2 程度の値となっている. 解析結果の抗力係数はそれぞれケ ースKで9.92,ケースLで7.73,ケースMで5.21となっ た. 各ケースの平均は 7.62 となり,実験結果と比較して過 大な結果となった.相対水深 1.0 の水平力はいずれのケー スも実験と比べて過大になっているため、抗力係数も過大 な値となった.

6. まとめ

本研究では、まず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.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 40~50 個,高さ方向におよそ 5 個,床版幅方向におよそ 20~30 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.

次に、上記の解析条件と推定精度の関係をもとに大西ら によって行われた抗力計測実験⁹⁾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 結果と解析結果の車模型に作用する水平力,抗力係数を比 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.車模型に作用する水平力の推定では相対水深 0.56 のケースBおよびケース Cの再現性が高かった.その他の ケースの結果は、流速が 50 cm/s より小さいケース(ケー ス A、ケース K、ケース L、ケース M)では水平力が過大 な結果となり、流速が 50 cm/s より大きいケースでは、水 平力が過小な結果となった.抗力係数の比較では、相対水 深 0.33 の平均は 0.1 程度小さく、相対水深 0.56 の平均は 0.4 程度大きい値で再現された.一方、相対水深 1.0 の平均 は 5.6 程度大きくなり再現性が低い結果となったため、詳 細な検討が必要である.

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:津波による橋梁の被災メカニズム 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.
- 7.10
 4) 押川英夫,大島崇史,小松利光:冠水時の自動車通行 の危険性に関する研究,河川技術論文集,第17巻, pp.461-466,2011.
- 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.
- 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.
- 注司学,鴫原良典,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.
- 9) 大西孝弘,岡本隆明,戸田圭一,石垣泰輔:氾濫時の 水没車の漂流挙動に関する実験的研究,京都大学防災 研究所年報,第57号B, pp.391-398, 2014.
- 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.
- 11) 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_vol 021.shtml#article3 top