

論文 粒子法による津波漂流物の衝突力に関する数値解析的検討

小尾 博俊^{*1}

要旨：本稿では粒子法の一つである SPH 法により津波を表現し、構造物に作用する津波漂流物の衝突力を数値解析的に評価することを試みた。漂流物には乗用車または大型バスを想定し、漂流物の衝突力を受ける構造物には鉄筋コンクリート製の杭を想定した。その結果、1) SPH 法の精度検証を目的としたダムブレイク実験との比較解析では、圧力の最大値やその履歴は概ね実験結果と整合すること、2) 漂流物の衝突を受ける構造物の損傷は、衝突時のパルス的な衝突力のみならず衝突後の津波による継続的な荷重の影響が大きいこと、3) 数値解析による漂流物衝突力のピーク値は、既往算定式と概ね同程度であること、等の知見が得られた。

キーワード：粒子法, SPH 法, 津波漂流物, 衝突力, ダムブレイク

1. はじめに

津波被害は、陸上に遡上した津波による直接的な被害と、遡上津波によって漂流した物体が構造物に衝突して生じる間接的な被害に分けられる。2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波そのものによる直接被害の他、沿岸部にある船舶や自動車等が漂流物となり、それらの衝突による間接被害が甚大なものとなった。これら間接被害の対策には、漂流物の衝突力を適切に評価することが極めて重要となる。

津波漂流物の衝突力に関する研究例としては、流木を対象とした松富¹⁾や池野ら²⁾の研究が、また船舶を対象とした池谷ら³⁾の研究、コンテナを対象とした水谷ら⁴⁾の研究がある。これらの研究ではいずれもパラメータの設定に課題は残るものの、水理実験に基づいた衝突力算定式が提案されている。

本稿では粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法により津波を表現し、構造物に作用する津波漂流物の衝突力を数値解析的に評価することを試みた。対象とする漂流物には乗用車または大型バスを想定し、衝突力を受ける構造物には鉄筋コンクリート製の杭を想定した。また、漂流物衝突解析に先立ち、SPH 法の精度検証を目的としてダムブレイク実験⁵⁾との比較解析を行い、漂流物衝突力の妥当性については上述した水谷らが提案した算定式との比較を行った。なお、本稿では解析コードとして LS-DYNA Version 971⁶⁾を用いた。

2. LS-DYNA における SPH 法の精度検証

2.1 解析条件

本章では SPH 法の精度検証を目的として、Kleefsman らが行ったダムブレイク実験との比較解析について述べる。この実験では図-1 に示すように、水柱の先に設置した障害物上の圧力 (図中の P1, P2, P3 および P4) を計測しており、これらの圧力履歴と数値解析結果を比較

する。水柱の粒子間隔は計算時間等を考慮し、深さ方向 550mm を 30 分割した 18.3mm 間隔、総数約 11.0 万粒子とした。障害物および境界壁は剛体を仮定し、要素寸法は粒子間隔程度とした。このときの解析モデルを図-2 に、また、数値解析に用いた水の物性値を表-1 に示す。

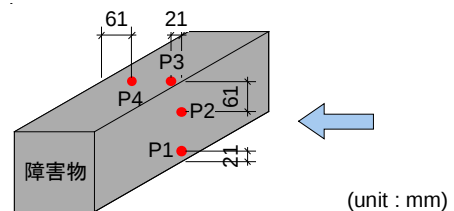
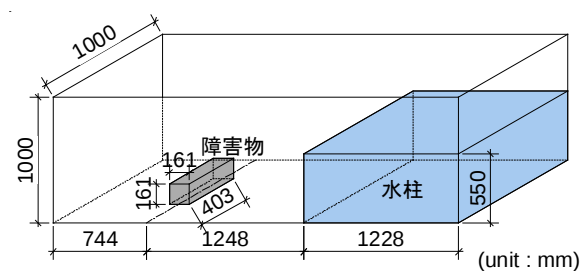


図-1 ダムブレイク実験

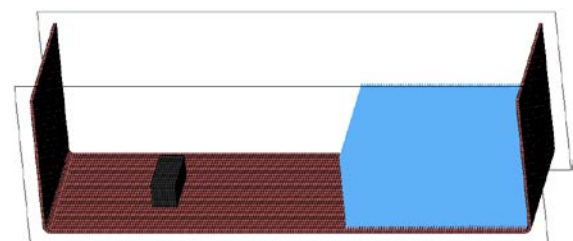


図-2 ダムブレイク解析モデル

表-1 水の物性値

体積弾性係数 K(MPa)	粘性係数 $\mu(\text{MPa} \cdot \text{s})$	密度 $\rho(\text{ton/mm}^3)$
2254.0	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}

^{*1} 大成建設 (株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 (正会員)

2.2 解析結果

各時刻における水の挙動を図-3に示す。水柱の崩壊後、流水はおよそ0.5秒で障害物の前面に到達する。その後、障害物に衝突して飛沫を上げながら跳ね上がる、あるいは障害物の両脇を通過し左境界壁に衝突して破碎する。さらに、破碎した水は落下し再び流水と結合して逆方向の流れを生じる。こうした水の挙動はKleefsmanらの実験と定性的に一致する。

次に、障害物上の圧力計測点P1、P2、P3およびP4の実験値と計算値を図-4にて比較する。ここでは、水粒子-障害物間の接触圧について、計測点を中心に障害物の幅方向403mmの1/3の区間を平均した値を計算値とした。まず、計測点P1については、圧力の立ち上がり時刻、最大値ともに良く一致しており、その後の履歴についても両者は比較的良好な一致を示している。P2については、P1と比べるとやや精度は劣るものの、圧力の立ち上がり時刻、その後の履歴はほぼ一致している。一方、P3、P4については、実験値と計算値にやや乖離が見られる。P4の0.9～1.3秒付近は、障害物の前面に衝突して跳ね上がった流水が落下する時間帯である。また、同様にP3、P4の1.6～2.2秒付近も障害物に衝突して高く跳ね上がった流水と左境界壁に衝突して破碎した流水が落下し、再び障害物の上面に衝突する時間帯である。このように流水が激しくぶつかり合う流況では計算精度が低下することが分かった。しかしながら、その後の履歴には差があ

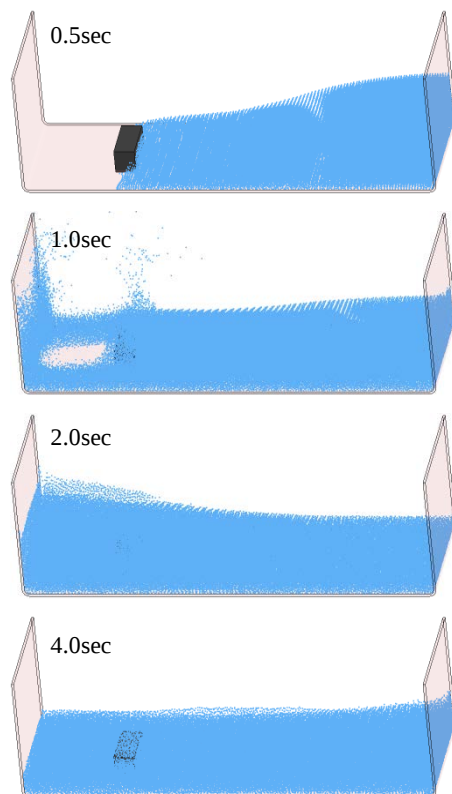


図-3 水の挙動

るものの、実験値と計算値はほぼ同様の傾向を示している。以上の比較検証から、一部に実験結果を表現できていない区間もあるが、幅方向に平均化した圧力の最大値やその履歴は概ね実験と同程度の結果が得られている。

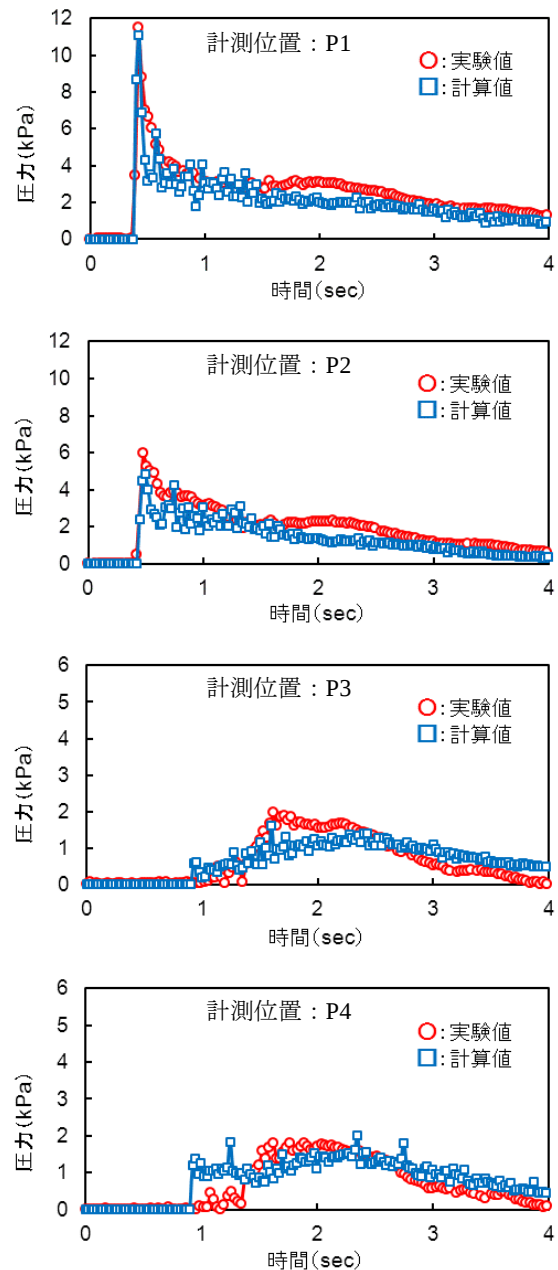


図-4 実験値と計算値の圧力比較

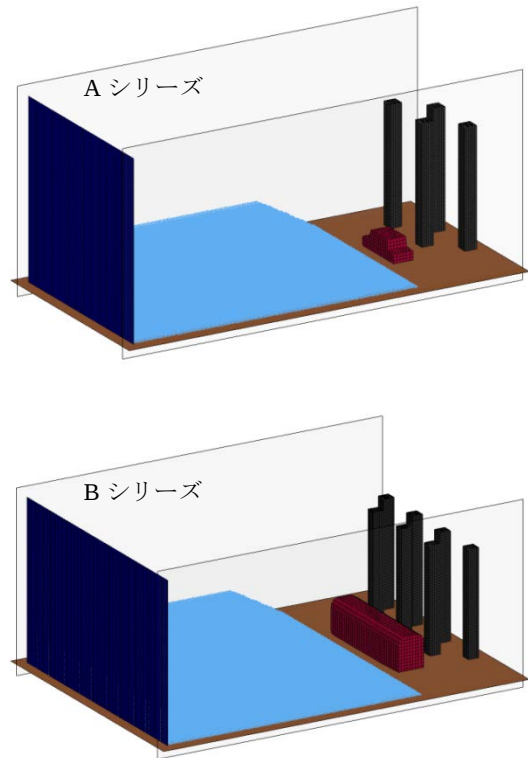
3. 津波漂流物の衝突解析

3.1 解析条件

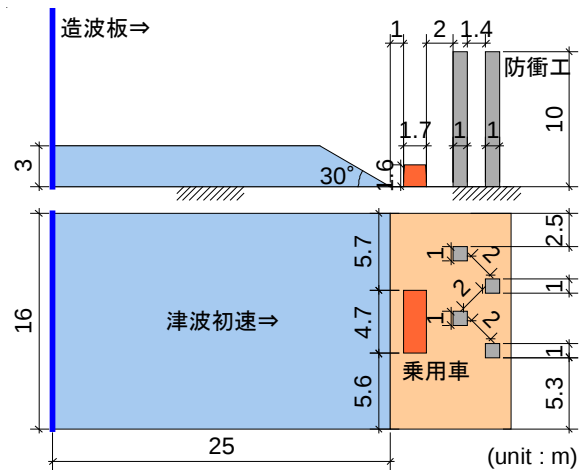
本章では、構造物に作用する津波漂流物の衝突力評価を目的として行った数値解析について述べる。解析ケースは、漂流物として乗用車（長さ 4.7m×幅 1.7m×高さ 1.6m、質量 1.5ton）を想定した A シリーズと大型バス（長さ 11.5m×幅 2.5m×高さ 3.2m、質量 13.0ton）を想定した B シリーズとした。これらの解析領域を図-5に示す。

漂流物のモデル化にあたっては、車両は極力単純な形状とし、タイヤ、窓ガラス、内装材等は考慮せず、車両をモデル化したシェル要素の密度を調整することで所定の質量を与えた。津波の粒子間隔は計算時間等を考慮し200mm 間隔とし、その総数は A シリーズで約 13.5 万粒子、B シリーズで約 20.3 万粒子とした。津波は初期条件として、初速 5.0m/s、水深 3.0m、波先勾配 30° を仮定した。また、津波粒子の最後部には造波板（剛板）を設け、速度 5.0m/s で強制的に水平移動させている。衝突力を受ける構造物には、漂流物の衝突から建物等を防護する目的で設置する鉄筋コンクリート製の杭（以降、防衛工⁷⁾と記す）を想定した。防衛工の配置は、漂流した乗用車が容易に通過できないように杭間を 2m とし、景観等の観点から千鳥配置とした。杭寸法は断面 1m×1m、高さ 10m とし、配筋は軸方向鉄筋として D32×12 本、帯鉄筋として D13@350mm ピッチを仮定した。なお、本解析では防衛工の基礎部は省略し底面を固定条件とした。また、

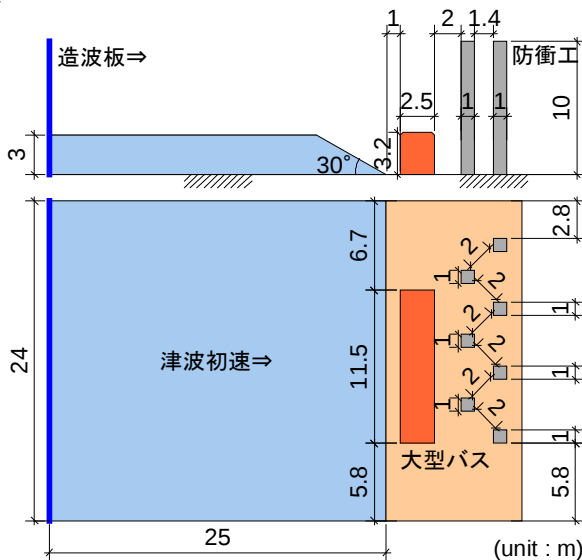
漂流物－地盤間、漂流物－防衛工間等の摩擦は考慮していない。このときの解析モデルを図－6 に示す。



図－6 漂流物衝突解析モデル



(a) A シリーズ



(b) B シリーズ

図－5 解析領域

解析ケースは表－2 に示すように、A、B 両シリーズとも津波初速 5.0m/s、漂流物および防衛工を非線形材料としたケース A-1、B-1 を基本ケースとする。これに対し、A-2、B-2 は漂流物および防衛工を線形材料とした場合、A-3、B-3 は津波をモデル化せずに漂流物を直接、防衛工に衝突させた場合であり、それぞれのケースで衝突力、損傷状況の違いを比較する。なお、A-3、B-3 で与えた漂流物の衝突速度は、A-1、B-1 の計算結果から得られた速度を用いている。さらに、A-4、B-4 として既往算定式を用いて数値解析結果との比較を行った。

ここで用いた算定式は水谷らが提案したもので、遡上津波によって漂流したコンテナの衝突力を対象としている。その中で、コンテナの衝突時にはコンテナ重量のみでなく、コンテナ背後の水塊が付加質量として働き衝突力を増大させると指摘している。しかし、算定式には衝突時間のような漂流物の剛性に依存する量が含まれており、その適用にあたっては課題が残されている。この算定式を示すと次のようになる。

$$F_m = \rho_w \alpha \eta_m B_c V_x^2 + \frac{W V_x}{g dt} \quad (1)$$

ここに、 F_m は漂流物の衝突力(kN)、 ρ_w は水の密度(ton/m³)、 $\alpha \eta_m$ は漂流物前面の水位(m)でここでは漂流物の高さとする。 B_c は漂流物の長さ(m)、 V_x は漂流物の速度(m/s)、

W は漂流物の重量(tonf), g は重力加速度(m/s^2), dt は衝突時間(s)である。

次に、数値解析に用いた材料物性値を表-3 に示す。防衛工のコンクリートはソリッド要素でモデル化し、材料構成則には Drucker-Prager 則を適用した。鉄筋はビーム要素で、漂流物はシェル要素でそれぞれモデル化し、ともに完全弾塑性体とした。また、車両の板厚は周囲のボディを 2~5mm, 底板を 10mm と仮定した。津波であ

る水の物性値は表-1 と同一とした。なお、数値計算における時間間隔は Courant の安定条件を満足するように自動設定とした。

3.2 解析結果

ケース A-1, B-1 における漂流物（衝突面節点の平均値）の速度履歴を図-7 に示す。漂流物は 0.2 秒付近で津波にさらわれ、その後、徐々に速度を増し、衝突時の速度は A-1 が 7.5m/s, B-1 が 6.9m/s となった。仮定した津波の初速は両ケースとも 5.0m/s であるが、重力の影響により津波先端の速度が増しこのような衝突速度に至ったものと推察される。衝突後は、A-1, B-1 とも速度 0m/s を中心に振動しており、漂流物は流されず防衛工によって堰き止められていることが分かる。このときの様子を図-8 に示す。漂流物の材料物性を非線形としているため、A-1, B-1 とも漂流物は原形を留めないほど押し潰されている。また、後述するが B-1 では、漂流物が衝突した防衛工の損傷が激しく杭が倒れ始めている。

一方、津波をモデル化せずに A-1, B-1 で得られた衝突速度を漂流物に与えて計算した A-3, B-3 の漂流物衝突速度を図-9 に示す。漂流物は衝突直後に負の速度、すなわち跳ね返りが生じる。B-3 は一部の区間で正の速度に戻るものの、再び、A-3 と同様に負の速度に転じている。このときの様子を図-10 に示す。A-3, B-3 も漂流物、防衛工は非線形材料としているが、図からは損傷の様子はほとんど見られない。このように、漂流物の衝

表-2 解析ケース

ケース	漂流物 (ton)	津波 (SPH 粒子)	津波初速 または 漂流物の 衝突速度 (m/s)	漂流物, 防衛工の 材料
A-1 (基本)	乗用車 (1.5)	あり	5.0	非線形
A-2				線形
A-3		なし	7.5	非線形
B-1 (基本)	大型バス (13.0)	あり	5.0	非線形
B-2				線形
B-3		なし	6.9	非線形
A-4	既往算定式			
B-4				

表-3 材料物性値

	防衛工		漂流物	
	コンクリート	鉄筋	乗用車	大型バス
弾性係数 $E(GPa)$	28	200	200	200
ポアソン比 ν	0.2	0.3	0.3	0.3
圧縮強度 $f_c(MPa)$	30	—	—	—
引張強度 $f_t(MPa)$ または 降伏強度 $f_y(MPa)$	2.2	345(D32) 295(D13)	215	215
密度 $\rho(ton/m^3)$ または 質量 $M(ton/台)$	2.3	7.85	1.5	13.0
板厚 $t(mm)$	—	—	2, 5, 10	3, 5, 10

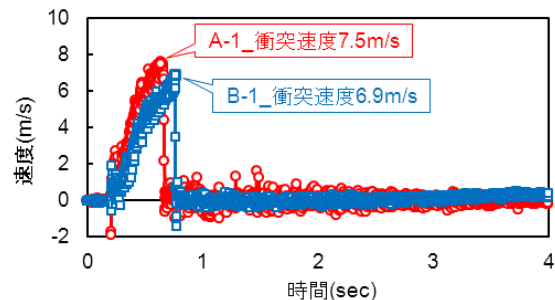


図-7 漂流物の速度時刻歴 (A-1, B-1)

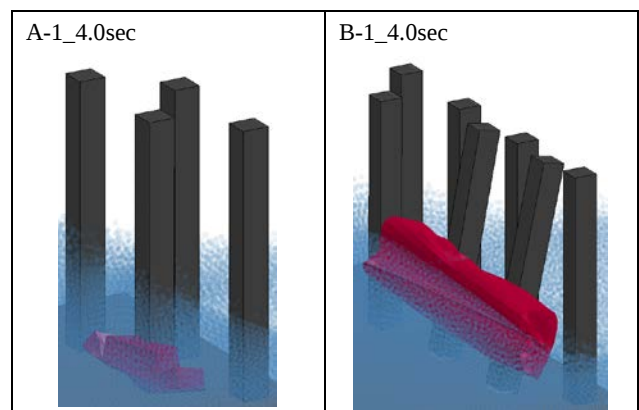


図-8 解析結果 (A-1, B-1)

突速度は等しくとも津波をモデル化することの有無により、漂流物および防衛工の挙動は全く異なる結果となった。

次に、A、B 両シリーズにおける漂流物の衝突力時刻歴を図-11 に示す。ここで衝突力とは、漂流物-防衛工間の水平方向の接触力を指す。まず、漂流物、防衛工を非線形材料とした A-1、A-3 における衝突時のピーク値は 1,300~1,400kN となり、B-1、B-3 のピーク値は 6,000~7,000kN となった。いずれも衝突時にパルス的な波形を示すが、津波モデル化の有無によらず衝突力のピーク値は概ね一致している。漂流物、防衛工を線形材料とした A-2、B-2 ではさらに高いピーク値を示している。このように、衝突時に極めて高い値を示した要因としては、車両底板（板厚 10mm）が最初に衝突したことによるものと考えられる。衝突後の履歴を見ると、A-1、A-2、B-1 および B-2 は漂流物が津波に押しつけられるため一定の力が作用し続けるのに対し、A-3、B-3 は上述したように、漂流物が直ちに跳ね返るため衝突力は 0 に戻っている。A-1、A-2 を比較すると、A-1 は 0.7~1.2 秒付近で衝突力が一時的に減少するが、この区間は車両の変形が進行している時間帯であり、その後は A-2 同様、衝突力はなだらかに減少していく。一方、B-1、B-2 を比較すると、B-1 はおよそ 1.6~1.8 秒にかけて衝突力が明らかに減少しており、この区間は車両の変形とともに車両が浮き上がっ

てくる時間帯である。その後は B-2 同様にほぼ一定値で推移している。さらに、A-4、B-4 は上述した既往算定式(1)より衝突力を求めたものあり、衝突時間 dt を 0.01 秒と仮定すると A-4 は 1,548kN、B-4 は 10,722kN となる。図より A-4 は、漂流物、防衛工を非線形材料とした A-1、A-3 と線形材料とした A-2 の中間の衝突力であり、また、B-4 についても同様に、B-1、B-3 と B-2 の中間の値となっている。このことは漂流物が車両の場合にも、コンテナを対象とした当算定式が適用できる可能性を示しているものと思われる。

続いて、漂流物、防衛工を非線形材料とした A-1、A-3、B-1 および B-3 について、その損傷状況を図-12 に示す。A-1 は漂流物が激しく損傷し、衝突を受けた防衛工にも比較的大きなひずみが生じているが、杭の傾きはほとんど認められない。A-3 では漂流物は僅かな損傷であり、防衛工についてはほとんど損傷していない。したがって、図-11 で示した衝突時に生じるパルスの衝突力は、防衛工の損傷にはほとんど影響していないことが分かる。B-1 では漂流物、防衛工ともに激しく損傷し、衝突を受

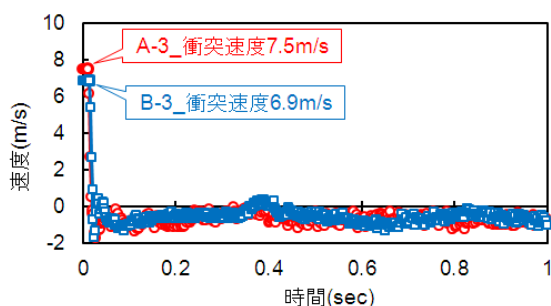


図-9 漂流物の速度時刻歴 (A-3, B-3)

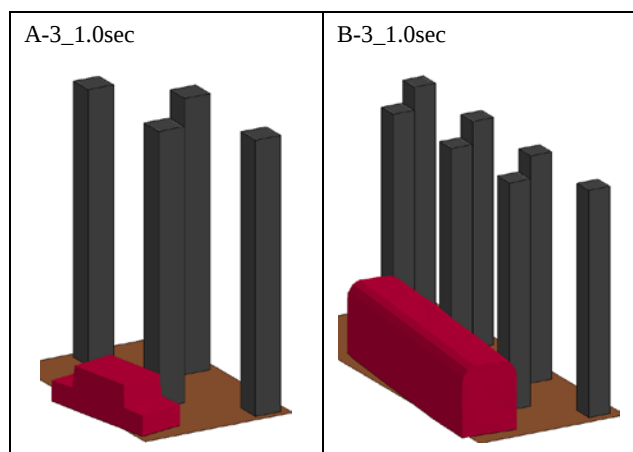
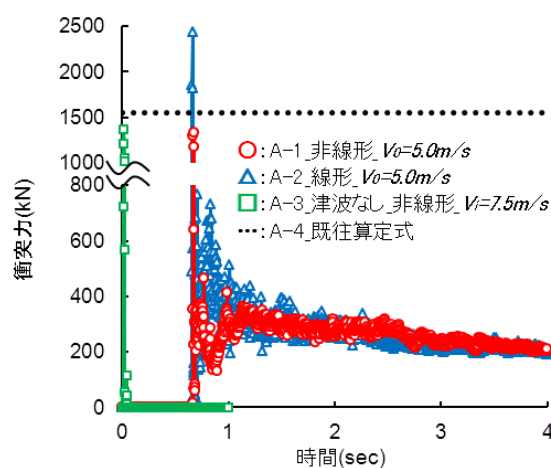
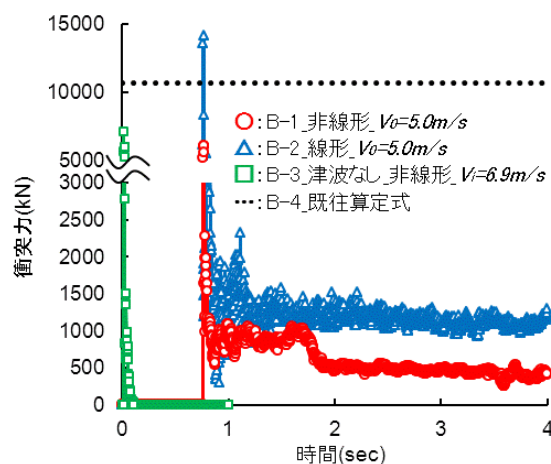


図-10 解析結果 (A-3, B-3)

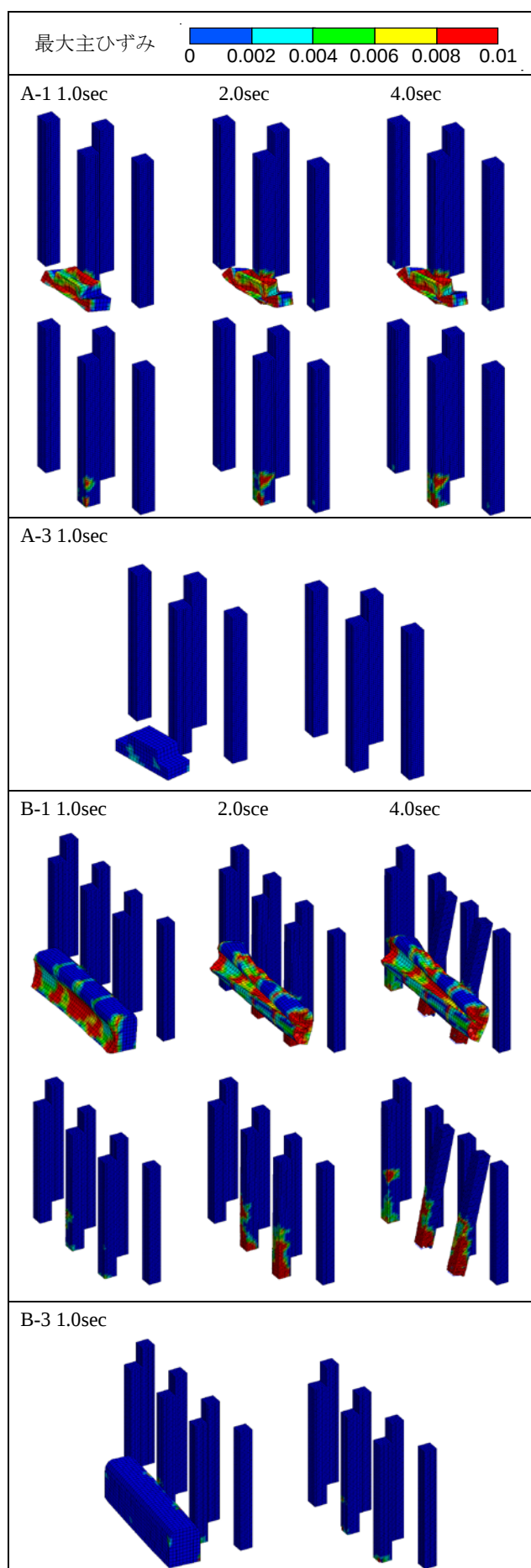


(a) A シリーズ



(b) B シリーズ

図-11 漂流物の衝突力時刻歴



図－12 漂流物・防衛工の損傷状況

けた防衛工は下部が破壊され倒れかけている。一方、B-3では漂流物は僅かな損傷であり、防衛工も衝突を受けた下部に損傷が見られるが杭の傾きはほとんど見られない。これらのことから本稿の条件内においては、衝突時のパルス的な衝突力が防衛工の損傷に及ぼす影響は少なく、衝突後の津波による継続的な荷重が大きく影響しているものと考えられる。

4. まとめ

本稿では SPH 法により津波をモデル化し、構造物に作用する津波漂流物の衝突力を数値解析で検討した。以下に、本稿の条件内で得られた知見をまとめる。

- (1) SPH 法の精度検証を目的としたダムブレイク実験との比較解析では、一部に実験結果を表現できていない区間もあるが、圧力の最大値やその履歴は概ね実験と同程度の結果が得られた。
- (2) 津波漂流物の衝突を受ける構造物の損傷は、衝突時のパルス的な衝突力のみならず衝突後の津波による継続的な荷重の影響が大きい。
- (3) 数値解析による漂流物衝突力のピーク値は、既往の算定式と概ね同程度であった。

今後は、SPH 粒子の密度差が津波波力に及ぼす影響や、津波の流速、水深をパラメータとした漂流物衝突力の特性等についてさらに検討を進めたい。

参考文献

- 1) 松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変形特性，土木学会論文集，No.621，pp.111-127，1999.5
- 2) 池野正明，森 信人，田中寛好：砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.846-850，2001
- 3) 池谷 毅ほか：津波による漂流物の衝突力の実験と評価方法の提案，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.276-280，2006
- 4) 水谷法美ほか：陸上津波によるコンテナの漂流と漂流衝突力に関する研究，第 20 回海洋工学シンポジウム，日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会，2008.3
- 5) K. M. T. Kleefsman others：A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems，Journal of Computational Physics，Vol.206，pp.363-393，2005
- 6) LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I，II Material Models，Version R7.0，LSTC，2013
- 7) 伊藤一教，羽角華奈子，織田幸伸，今村文彦：漂流物対策として防衛工を配置した津波避難ビルに作用する津波波力に関する水理実験，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，pp.I-811-I-815，2013