

橋桁に作用する津波漂流物の動態に関する 実験的検討

庄司 学¹・Liu Xiaojiao²・飯高 稔³

¹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

²学生会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (同上)
E-mail: s1820957@s.tsukuba.ac.jp

³筑波大学システム情報系 (同上)
E-mail: iidaka@sie.tsukuba.ac.jp

本研究では、橋桁への津波荷重評価の枠組みにおいて、水理模型実験を通じ、橋桁に作用する津波漂流物の動態を明らかにした。具体的には、津波漂流物を断面のサイズと長さが異なる6種類の直方体角柱で模擬し、津波漂流物が橋桁の桁下空間や橋面上を漂流あるいは滞留する現象の再現を実験的に試みた。漂流物の通過率 γ_p 、漂流物の体積及び長さの観点からの閉塞率 γ_{cb} 、 γ_{cl} 、及び、漂流物の橋面上の残留率 γ_l に関するパラメータを定義して、それらと津波流速、橋桁の前面波高 a_f 及び背面波高 a_r との関係を明らかにした。また、既往の研究において得られているダムの崩壊流れの理論氾濫流速 u_2 と実験値を比較するなどして、実験データに対する理論的な解釈を行なった。

Key Words : tsunami ,bridge deck, tsunami floating bodies, hydraulic experiment

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波によって橋梁構造物に東日本の広域に甚大な被害が発生し、多大な道路交通支障が発生した。

津波の作用に対する橋梁構造物の脆弱性評価に関しては、2004年インド洋大津波における橋梁被害を主な契機として、様々な研究事例が報告されており、例えば、庄司、森¹⁾の研究では橋桁の横移動と津波流速との関係性を定量的に明らかにしている。さらに、2011年東日本大震災を受けて、土木学会・地震工学委員会・東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会(委員長:幸左賢二・九州工業大学教授(当時))²⁾によって、東北地方太平洋沖地震津波で被災した橋梁を対象とし、そのデータ収集から被災メカニズムの解明に至る一連の体系的な研究が試みられている。橋梁に対する津波作用のメカニズムに関しては、それらの研究事例の一例として、庄司ら³⁾の研究において津波を模擬した水理実験に基づき、水位、水面上昇速度、津波流速及び波速の4つのパラメータから橋桁に作用する津波波力及び津波波圧のモデル化が試

みられている。近年においては、特に、それらに関する実験データのベンチマークを目的とした研究も多数実施されてきている⁴⁾⁷⁾。

一方、地盤に固定されていない沿岸域の物体や津波により被災した構造部材等が津波漂流物になり、これらが混相した津波が橋桁に作用することとなる。具体的に津波漂流物となり得るのは車、木片、コンクリート片等であり、これらが橋梁構造物にランダムに衝突したり桁下空間や橋面上に滞留したりすることになる。

津波漂流物に関しては、様々な実験的な研究事例が報告されている。松富ら⁸⁾は漂流物を伴う氾濫流における漂流物の塞き止め現象を理論的に理解し、モデル化を試みている。阿部ら⁹⁾は波状段波による氷板輸送過程を再現した水理実験に基づき、河道内氷板の挙動及び波状段波と河道内氷板の相互作用を明らかにしている。嶋原ら¹⁰⁾及び許ら¹¹⁾は津波による船舶群の漂流、座礁現象を再現した水理実験を行い、漂流現象の傾向を分析するとともにその数値再現モデルの精度について論じている。しかし、津波漂流物を考慮した橋梁構造物の被害メカニズムに係る実験的検討は少ない。

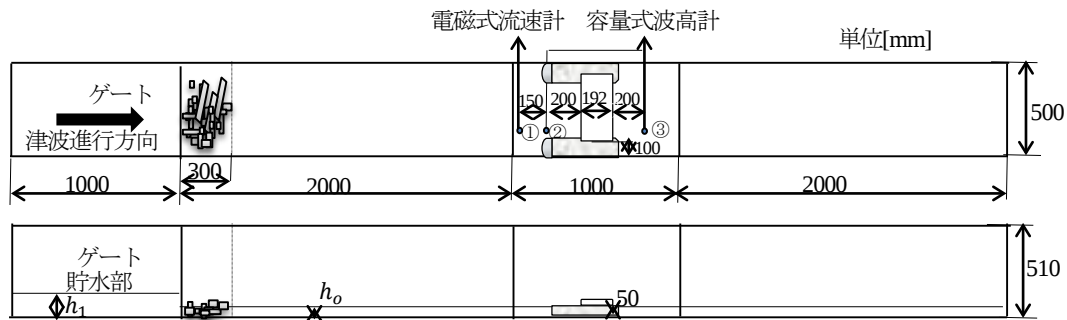


図-1 実験水路及び模型設置状況

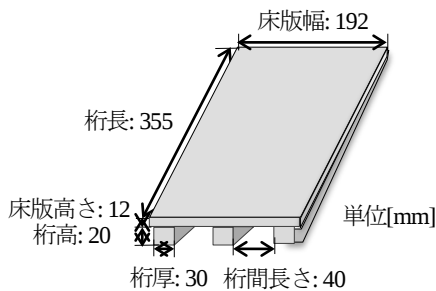


図-2 橋桁模型

表-1 津波漂流物模型

番号	実 際 長 さ [mm]	長 さ [mm]	幅 [mm]	高 さ [mm]	数 量	重量(浸水 1 時間)[g]	密度(浸水 1 時間) [kg/m ³]
1	1000	18.5	10	10	38	1.79	967.57
2	3000	55.5	10	10	17	5.1	918.92
3	5000	92.5	10	10	9	8.01	865.95
4	4850	90	20	12	12	21.2	981.49
5	8000	150	20	12	5	34.8	996.67
6	5400	100	60	27	3	95.67	590.56

表-2 実験条件

番 号	静水深 h_0 [cm]	桁下高 h_c [cm]	貯水部水位 h_1 [cm]	記号
1	2	3	9	●
2	3	2	9	●
3	2	3	10	▲
4	3	2	10	▲
5	4	1	10	▲
6	2	3	12	■
7	3	2	12	■
8	4	1	12	■
9	2	3	15	■
10	3	2	15	■
11	4	1	15	■

以上より、本研究では、断面のサイズと長さが異なる 6 種類の直方体角柱で津波漂流物を模擬し、水理実験を行なうことで、橋桁に作用する津波漂流物の動態を明らかにする。具体的には、津波漂流物が橋桁の桁下空間や橋面上に漂流あるいは滞留する現象の実験的な再現を試みる。漂流物の通過率及び漂流物の閉塞率に関する 6 つのパラメータを定義して、それらと津波流速、橋桁の前面波高 a_f 及び背面波高 a_r との関係を明らかにする。また、既往の研究において示されているダムの崩壊流れの理論汎濫流速 u_2 と実験値との比較を行なうなどして、実験データに対する理論的な考察を行なう。

2. 実験方法

実験水路を図-1 に示す。橋桁は、その中心線がゲートから流下方向 2500mm の位置となるように、橋台の上にそのまま設置した。漂流物の通過及び閉塞状況を観測するために、橋桁重心の真上と真下にビデオカメラ（上：CANON 製 DM-XV1, 下：NIKON 製 COOLPIX AW100）を設置した。その上で、ゲート開放から 40 秒間のビデオデータの撮影を行った。計測した物理量は津波流速、橋桁前面及び背面の波高である。津波流速に関しては、図-1 の①の位置に電磁流速計(KENEK 製, VM-201HT), 波高に関しては②および③の位置に容量式波高計(KENEK 製, CH-601)をそれぞれ設置した。容量式波高計は橋桁模型の前面端部及び背面端部より 200mm の位置、かつ、一方の橋台より 40mm の位置にそれぞれ設置した。電磁流速計は前面波高計より 150mm の位置、かつ、一方の橋台より 40mm の位置に設置した。データのサンプリング間隔は 1/1000 秒としゲート開放から 40 秒間のデータ計測を行った。

橋桁模型はコンクリート(単位体積重量 $\rho_g=2.254\text{kN/m}^3$)で製作した。橋桁の構造形式は典型的にみられる単径間 RC/PC 桁とした。ここでは、2004 年インド洋大津波で被災した単径間 RC 桁橋である Lueng Ie Bridge(インドネシア・北スマトラ島)を取りあげ¹²⁾、この橋梁の構造諸元を図-2 に示すように幾何学的に 1/53.8 に縮尺した。また、実際の橋桁は 5 主桁であったが、模型製作における加工の困難さの観

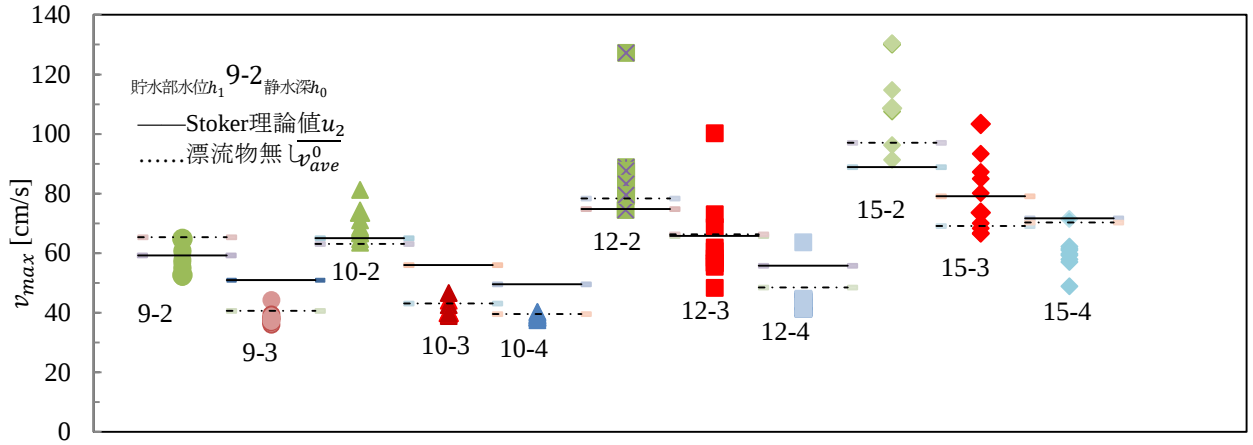
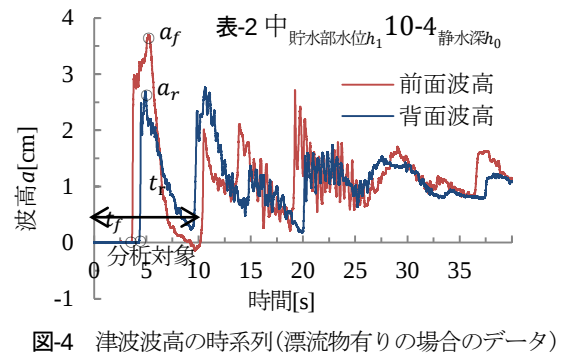
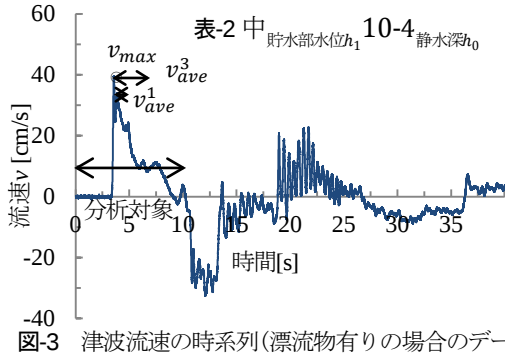


図-5 流速のピーク値 v_{max} と貯水部水位 h_1 及び静水深 h_0 の関係

点から、3 主桁に変更した。

漂流物模型の断面サイズ、長さ、及び、浸水 1 時間後の重量を表-1 に示す。漂流物模型は橋桁模型と同じ比率で 1/53.8 に縮尺した。漂流物模型は直方体の木材（乾状態比重 0.53）を用いた。松富ら⁹⁾の研究を参考して漂流物模型の比重が大きく変化しないように、実験前に 1 時間漂流物模型を水に浸すこととした。表-1 に示す全ての漂流物は混合して漂流物群としてゲートから 300mm 範囲内の静水部に配置した。実験条件を表-2 に示す。津波の流れ場では、漂流物相互が影響を及ぼし合い、波の形成において不確実性が大きくなることから、その点を許容して、漂流物有りのケースにおいては表-2 の条件で 10 回繰り返した。津波流速及び波高の特徴を考察するために、漂流物無しのケースにおいては表-2 の条件で 3 回繰り返した。

3. 津波波速の定義と津波流速及び波高に対する考察

津波流速 v 及び津波波高 a の時系列の一例をそれぞれ図-3 及び図-4 に示す。図-3 に示した津波流速 v の時系列において 4 秒前後に発生するピーク値を v_{max} [cm/s] と定義した。また、津波流速の時系列に対してピーク値とな

る直後の 1 秒間並びに 3 秒間の時間平均を v_{ave}^1 [cm/s]、 v_{ave}^3 [cm/s] とする。津波流速の時系列において 10 秒前後のマイナスの流速は水路流下方向末端部からの反射波が橋桁に到達していることを意味している。本研究において橋桁前面に衝撃的に作用する初期の過程を考察する観点から、反射波が橋桁に到達する前の状態のみを分析対象とした。また、図-4 に示した津波波高に対して前面及び背面波高の時系列のピーク値を a_f [cm]、 a_r [cm] とし、前面及び背面波高の立ち上がり時刻を t_f [s]、 t_r [s] と定義した。以上より、津波波速 c を以下の式で定義した。

$$c = \frac{L}{t_r - t_f} \quad (1)$$

ここで、 L は橋桁前面に設置した波高計から橋桁背面に設置した波高計までの距離で、 $L=59.2$ cm である。

図-5 は、漂流物有りの条件のもとで、津波流速のピーク値 v_{max} と貯水部水位 h_1 及び静水深 h_0 の関係を示す。図中のケース番号は表-2 に示す通り、例えば、ケース番号 9-2 は漂流物有り、貯水部水位 $h_1=9$ cm、静水深 $h_0=2$ cm という実験条件を表わしている。また、漂流物無しの条件における津波流速のピーク値の 3 回の平均値 $\overline{v_{max}^0}$ は図-5 に破線で示している。

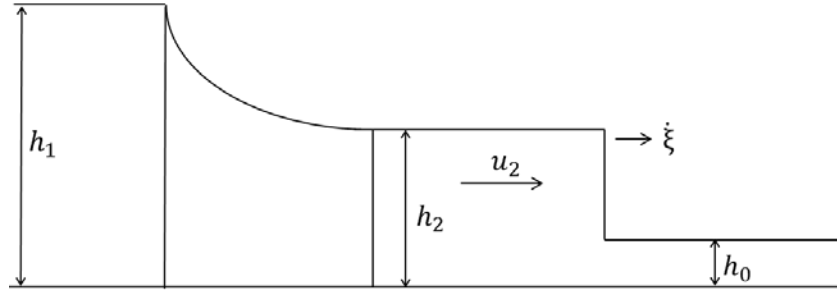


図-6 Stoker モデル¹³⁾

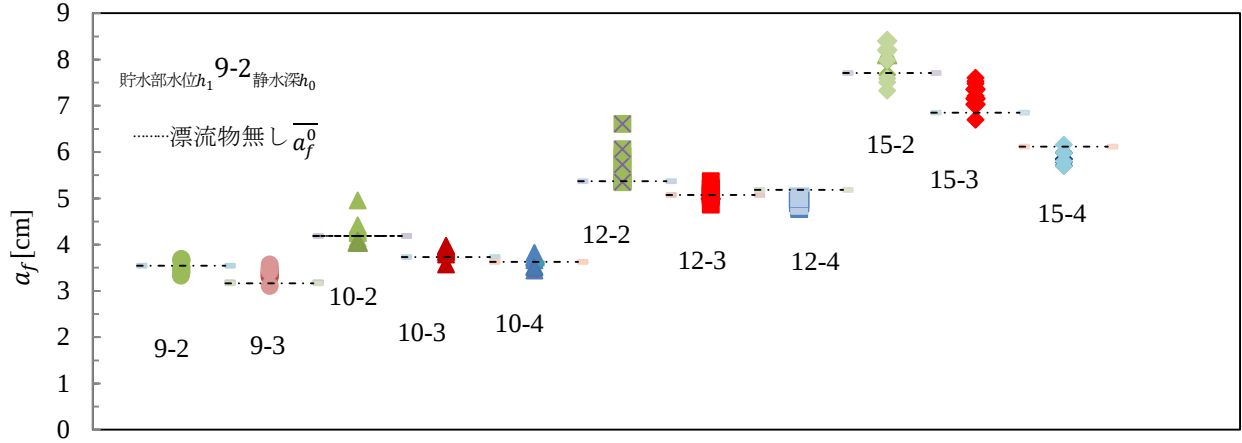


図-7 前面波高 a_f と貯水部水位 h_1 及び静水深 h_0 の関係

さらに、漂流物無しの場合においては、Stoker¹³⁾によるダム崩壊流の理論汜濫流速 u_2 と比較するために、その理論値 u_2 を図-5に実線で表している。なお、Stokerの理論においては、瞬時的にダムブレイクするという条件のもと、ダムの崩壊流れに対する問題をモデル化して、ダムの上流域水深 h_1 と下流域水深 h_0 から理論汜濫流速 u_2 を得る。ダム崩壊直後の時刻における、Stokerのモデルを図-6に示す。これによれば、ゲート急開直後の流れ場において、波の先端部の上流域の流速 u_2 に対して以下の関係式を得る。

$$\frac{u_2}{c_0} + 2 \frac{c_2}{c_0} = 2 \frac{c_1}{c_0} \quad (2a)$$

ここで、 c_i は水深 h_i での波速で、次式により求められる。

$$c_i^2 = gh_i \quad (2b)$$

各実験データに対しては、貯水部水位 h_1 と静水深 h_0 が与えられているので、式(2b)を用いて、 c_1 と c_0 がそれぞれ求められる。また、 u_2/c_0 と c_2/c_0 が以下の式より求められる。

$$\frac{u_2}{c_0} = \frac{\xi}{c_0} - \frac{c_0}{4\xi} \left(1 + \sqrt{1 + 8 \left(\frac{\xi}{c_0} \right)^2} \right) \quad (2c)$$

$$\frac{c_2}{c_0} = \left\{ \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \left(\frac{\xi}{c_0} \right)^2} - 1 \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2d)$$

ここで ξ は図-6に示すように波の先端部の伝播速度である。

以上より、ゲート急開直後の流れ場において、Stokerの理論を適用すると、貯水部水位 h_1 と静水深 h_0 が与えられているので、波の伝播速度 ξ が式(2a)、(2c)、(2d)から求められ、さらに、式(2c)を再度適用し波の先端部における上流域の流速 u_2 を得る。

図-5において、貯水部水位 h_1 が高くなり、また、静水深 h_0 は低くなるほど、津波流速のピーク値 v_{max} は大きくなる。次に、静水深 $h_0=3\text{cm}$ 、 4cm の場合に、 v_{max} は全般的にStokerの理論値 u_2 より低くなる。 $h_0=2\text{cm}$ の場合には、逆に v_{max} は全般的にStokerの理論値より大きくなる傾向を示す。一方、松富ら⁸⁾の実験において漂流物が白木材の場合には、実験値が全般的にStokerの理論値より低くなっている。また、松富ら¹⁴⁾の実験において漂流物が瓦礫や油の場合には、実験値は全般的にStokerの理論値より大きくなっている。こ

のように、先行研究においては、漂流物の材質や混相の状態に応じて、実験値とStokerの理論値との大小関係に相違がみられるが、本実験結果に対しても同様のトレンドを示す結果となった。

図-7は、漂流物有りの条件における前面波高 a_f と貯水部水位 h_1 及び静水深 h_0 の関係を示す。また、漂流物無しの条件において、前面波高の3回の平均値 $\overline{a_f^0}$ を破線で示す。貯水部水位 h_1 が高くなり、また、静水深 h_0 が低くなるほど、図-5に示す流速の変化の傾向と質量保存則から、前面波高 a_f は高くなる傾向を示す。さらに、漂流物有無の影響に着目すると、明らかな傾向が見られず、図-5に示した流速の変化の傾向と比べて、波高の変化は漂流物有無に対して感度が低いと言える。

4. 漂流物の通過率、残留率及び閉塞率に関するパラメータの定義

実験ビデオデータに対して、Video Win Movie Makerのソフトウェアを用いて再生速度を0.1倍遅くなるように変換した上で、再生最小時間間隔を0.03sと設定し、目視により、最初の衝撃的な波が収まった直後の漂流物の運動状況を観察した。

以上より、以下の漂流物の通過率、閉塞率及び残留率に関する6つのパラメータを算定する。

漂流物の占有率 e は以下の式で定義する。

$$e = \frac{V_f}{V_w} \quad (3)$$

ここで、 V_w は水路の一樣水深部(長さ 5000mm×幅 500mm×静水深 h_0)における水の全体積、 V_f は漂流物の占有体積、すなわち漂流物の全体積である。

次に、漂流物の通過率 γ_p は以下の式で定義する。

$$\gamma_p = \frac{V_p}{V_f} \quad (4a)$$

$$\gamma_p = \gamma_{pn} + \gamma_{pl} \quad (4b)$$

ここで、 V_p は流れた漂流物の体積である。また、 γ_{pn} 、 γ_{pl} は以下の式で定義する。

$$\gamma_{pn} = \frac{V_{pn}}{V_f} \quad (5a)$$

$$\gamma_{pl} = \frac{V_{pl}}{V_f} \quad (5b)$$

ここで、 V_{pn} は橋桁に衝突せずに流れた漂流物の体積、 V_{pl}

は橋桁に衝突して流れた漂流物の体積である。

さらに、漂流物の体積の観点からの閉塞率 γ_{cv} を以下の式で定義する。

$$\gamma_{cv} = \frac{V_{cv}}{V_f} \quad (6)$$

ここで、 V_{cv} は橋桁に衝突して、橋桁の前面部及び橋桁の桁下空間に詰まった漂流物の体積である。

同様に、漂流物の長さの観点からの閉塞率 γ_{cl} を以下の式で定義する。

$$\gamma_{cl} = \frac{L_f}{L_b} \quad (7)$$

ここで、 L_b は桁長から橋台の桁かかり長を引いた長さである。 L_f については漂流物が橋桁に衝突して部分的に桁下空間に詰まり、それらの長手方向の長さを橋軸方向に正射影した長さの中の最大値を採用する。

最後に、漂流物の残留率 γ_l は以下の式で定義する。

$$\gamma_l = \frac{V_l}{V_f} \quad (8)$$

ここで、 V_l は橋桁上に残留した漂流物の体積である。

5. 実験結果に関する考察

(1) 津波流速と漂流物の通過率、閉塞率及び残留率の関係

a) 津波流速のピーク値 v_{max} と漂流物の通過率 γ_p 、 γ_{pn} 及び γ_{pl} の関係

図-8において、津波流速のピーク値 v_{max} [cm/s]と漂流物の通過率 γ_p の関係に着目すると、桁下高が一番低い $hc=1\text{cm}(e=0.0146)$ の場合(10-4, 12-4, 15-4)には、実験ケース 10-4 の一部のデータを除いて $37.58\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 71.47\text{cm/s}$ の領域で $0.0149 \leq \gamma_p \leq 0.3472$ となる。なお、実験ケース 10-4 において、実験の4回目のデータである 10-4-4 以外のデータは橋桁の前面に全ての漂流物が流れ場の中で停止してしまった。このため、漂流物が橋桁の桁下空間や橋面上を通過し始めたのは実験ケース 12-4 からである。その際、 v_{max} が大きくなるに従って γ_p は高くなる傾向を示した。これらの場合より桁下高が高い $hc=2\text{cm}(e=0.0194)$ の場合(9-3, 10-3, 12-3, 15-3)には、 $36.05\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 103.41\text{cm/s}$ の領域で $0.0775 \leq \gamma_p \leq 0.7802$ となり、 $hc=1\text{cm}$ の場合と同様に v_{max} が大きくなるに従って γ_p は高くなる傾向が見られた。桁下高が最大となる $hc=3\text{cm}(e=0.0291)$ の場合(9-2, 10-2, 12-2, 15-2)には、 $35.19\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 130.48\text{cm/s}$ の領域で $0.1904 \leq \gamma_p \leq 0.8458$ となり、流速が低い段階で一定量の漂流物が橋桁を

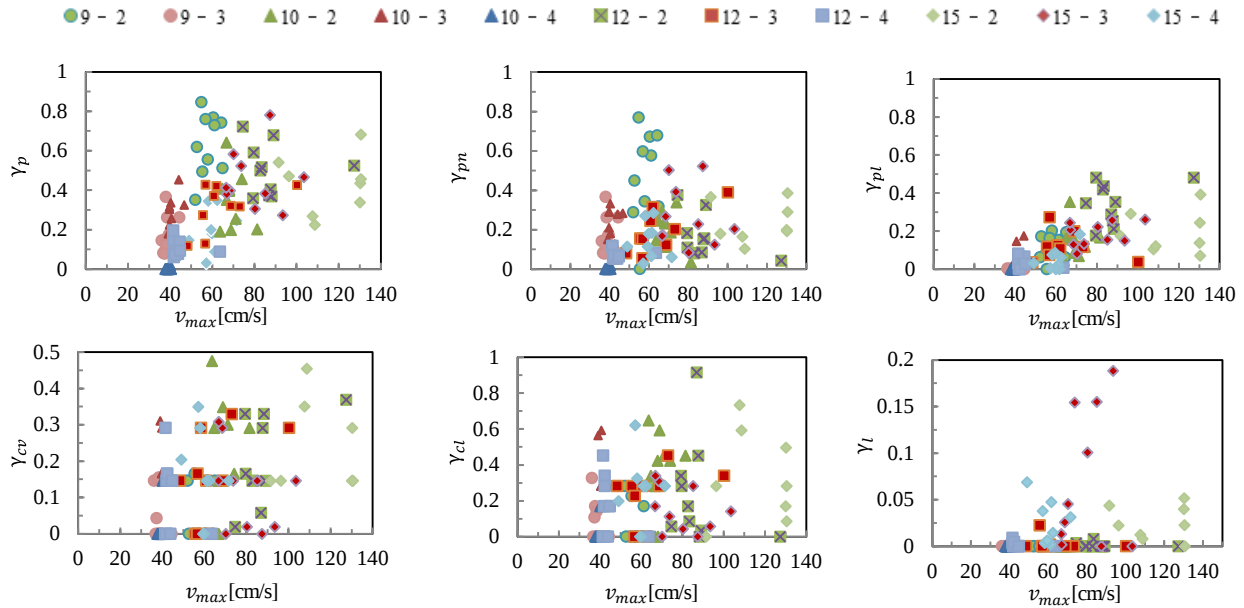


図-8 流速の最大値 v_{max} と漂流物の通過率、閉塞率及び残留率の関係

通過し、流速が極めて速くなる段階までその通過率 γ_p を保持するような状態変化を示す。

以上の通過率 γ_p の傾向を踏まえ、橋桁に衝突せずに流れた漂流物の通過率 γ_{pn} 並びに橋桁に衝突して流れた漂流物の通過率 γ_{pl} の内訳の観点から分析する。まず、橋桁に衝突せずに流れた漂流物の通過率 γ_{pn} の観点からは、全てのケースにおいて、 $36.05\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 130.48\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{pn} \leq 0.769$ となる。これらの中で、特に実験ケース9-2において、橋桁に衝突せずに通過した漂流物の割合が高く、 $54.78\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 64.86\text{cm/s}$ の領域で $0.5753 \leq \gamma_{pn} \leq 0.769$ となる。また、桁下高が一番低い $hc=1\text{cm}(e=0.0146)$ の場合(10-4, 12-4, 15-4)には、 $37.59\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 71.47\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{pn} \leq 0.2844$ となり、 v_{max} が大きくなるに従って γ_{pn} が高くなる傾向を示す。この場合より桁下高が高い $hc=2\text{cm}(e=0.0194)$ の場合(9-3, 10-3, 12-3, 15-3)には、 $37.58\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 103.41\text{cm/s}$ の領域で $0.0534 \leq \gamma_{pn} \leq 0.5220$ となるが、これは橋桁に衝突せずに流れる漂流物が一定量に達し、その通過率 γ_{pn} が横ばいに近い状態になったことを表わしている。桁下高が最大となる $hc=3\text{cm}(e=0.0291)$ の場合(9-2, 10-2, 12-2, 15-2)には、 $51.99\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 130.48\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{pn} \leq 0.769$ となり、逆に、 v_{max} が大きくなるに従って橋桁に衝突せずに流れる漂流物の割合が小さくなる傾向を示す。

一方、橋桁に衝突して流れた漂流物の通過率 γ_{pl} の観点からは、 $36.05\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 130.48\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{pl} \leq 0.4813$ となる。桁下高が一番低い $hc=1\text{cm}(e=0.0146)$ の場合(10-4, 12-4, 15-4)には、 v_{max} が大きくなるに従って橋桁に衝突せずに流れた漂流物の通過率 γ_{pn} と同様に γ_{pl} も高くなる傾向が見られる。これらの場合より桁下高が

高い $hc=2\text{cm}(e=0.0194)$ の場合(9-3, 10-3, 12-3, 15-3)には、 v_{max} が大きくなるに従って橋桁に衝突せずに流れた漂流物の通過率 γ_{pn} は先述したように一定値に収束する傾向が見られる反面、 γ_{pl} は高くなっていく傾向を示す。桁下高が最大となる $hc=3\text{cm}(e=0.0291)$ の場合(9-2, 10-2, 12-2, 15-2)には、橋桁に衝突せずに流れる漂流物は一定の割合でシェアが低くなり、橋桁に衝突して流れる漂流物のシェアが高くなり、その通過率 γ_{pl} が高くなる傾向が見られる。

漂流物の橋桁への衝突のシェアを考察するために、橋桁の桁下空間や橋面上に通過した漂流物に対する、橋桁に衝突して流れた漂流物の割合 γ_{pl}/γ_p を図-9のように計算した。 $36.04\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 83.30\text{cm/s}$ の領域で、 v_{max} が大きくなるほど、全体的には γ_{pl}/γ_p が大きくなる傾向を示した。 $36.04\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 66.76\text{cm/s}$ の流速が相対的に低い領域では、一部のデータを除いて、衝突して流れた漂流物の割合 γ_{pl}/γ_p は50%には至らない。すなわち、橋桁に衝突して流れた漂流物より、衝突せずに流れた漂流物の割合が大きい。 $79.52\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 83.30\text{cm/s}$ の流速が相対的に高い領域では、 γ_{pl}/γ_p が $0.81 \leq \gamma_{pl}/\gamma_p \leq 0.84$ の範囲でピークを示すとともに、 $83.30\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 130.48\text{cm/s}$ の流速が高い領域では $v_{max}=127.28\text{cm/s}$ において、最大値 $\gamma_{pl}/\gamma_p=0.919$ を示す。この場合には、橋桁の桁下空間や橋面上に通過した漂流物の中で、9割合以上の漂流物が橋桁に衝突して流れたことを意味する。

b) 流速 v_{max} と漂流物の閉塞率 γ_{cv} 、 γ_{cl} 及び漂流物の残留率 γ_l の関係

図-8において、 v_{max} と漂流物の体積の観点からの閉塞率 γ_{cv} の関係に着目すると、 $36.05\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 130.48\text{cm/s}$

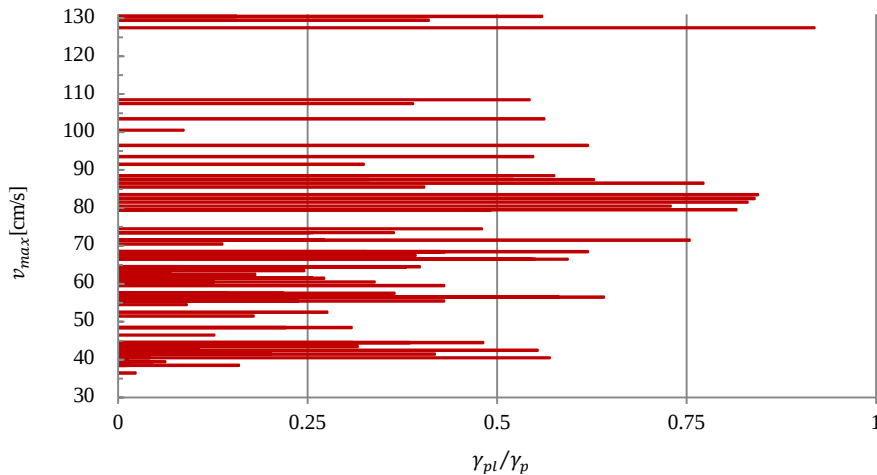


図-9 漂流物の橋桁への衝突割合 γ_{pl}/γ_p と流速の最大値 v_{max} の関係

の領域で $0.00 \leq \gamma_{cv} \leq 0.4757$ となる。 γ_{cv} の値は $\gamma_{cv}=0$, 0.1458 , 0.2916 の3つの大別される。 $\gamma_{cv}=0.00$ の場合は漂流物が全て橋桁の桁下空間や橋面上に通過して閉塞しない場合である。 $\gamma_{cv}=0.1458$ の場合は表-1 に示す漂流物 6 番が 1 個のみ橋桁の桁下に閉塞する場合である。 $\gamma_{cv}=0.2916$ の場合は同様の漂流物 6 番が 2 個橋桁の桁下に閉塞した場合である。これらのケースでは漂流物 6 番以外の漂流物は全て橋桁の桁下空間や橋面上を通過する。このことから、重量及び体積の観点から最も大きい漂流物 6 番の桁下への閉塞が閉塞率に支配的な影響を及ぼすことがわかる。なお、 v_{max} が大きくなるに従って、全体的には γ_{cv} は大きくなる傾向を示す。特に、実験ケース 15-2 の場合には、 $91.38\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 130.48\text{ cm/s}$ の領域で、全ての実験回数において $\gamma_{cv} \geq 0.1458$ となる。

次に、 v_{max} と漂流物の長さの観点からの閉塞率 γ_{cl} の関係に着目すると、 $37.58\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 130.48\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{cl} \leq 0.9154$ となる。これは、漂流物の体積の観点からの閉塞率 γ_{cv} と調和的な傾向を示す。また、およそ 4 割合以上の実験ケースにおいて $0.1690 \leq \gamma_{cl} \leq 0.45$ の閉塞率 γ_{cl} を示した。漂流物の長さの観点からの閉塞率 γ_{cl} については、 v_{max} が低い場合にも漂流物が橋桁の桁下空間に閉塞することから γ_{cl} が一定値を示すこととなる。

v_{max} と残留率 γ_l の関係に着目すると、 $36.05\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 130.48\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_l \leq 0.1881$ となる。貯水部水が $h_1=9\text{cm}$ の場合 (9-2, 9-3) 及び貯水部水位が $h_1=10\text{cm}$ の場合 (10-2, 10-3, 10-4) には $36.04\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 64.87\text{cm/s}$ 及び $37.59\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 81.30\text{cm/s}$ のそれぞれの領域において $\gamma_l=0.00$ となる、これらの場合には漂流物が橋桁の橋面上に残留しないことを意味する。特に、第 5 章(1) a) に先述したように、実験ケース 10-4 は 10-4-4 以外の場合には橋桁の前で全て漂流物が停止する。貯水部水位が $h_1=12\text{cm}$ の場合 (12-2, 12-3, 12-4) には、漂流物が橋桁の橋面上に残留し始め、貯水部水位が $h_1=15\text{cm}$ の場合

(15-2, 15-3, 15-4) には、およそ 1 割合以上の漂流物が橋桁の橋面上に残留する。特に実験ケース 15-3 では、 $v_{max}=93.40\text{cm/s}$ において、残留率 $\gamma_l=0.1881$ の最大値を示す。前述した漂流物の閉塞のメカニズムと異なり、橋桁の橋面上に漂流物が残留するメカニズムについては、表-1 に示す漂流物 1 番の占める割合が最大 0.158 となり、同様に、漂流物 2 番, 3 番, 4 番の占める割合がそれぞれ最大 0.118 , 0.222 , 0.083 となった。

c) 流速 v_{ave}^1 及び v_{ave}^3 と漂流物の通過率 γ_p , γ_{pn} 及び γ_{pl} の関係

図-10 と図-11 において、流速 1 秒間の時間平均 v_{ave}^1 [cm/s] 及び流速 3 秒間の時間平均 v_{ave}^3 [cm/s] と γ_p の関係に着目すると、 $20.01\text{cm/s} \leq v_{ave}^1 \leq 75.89\text{cm/s}$ 及び $10.97\text{cm/s} \leq v_{ave}^3 \leq 44.43\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_p \leq 0.8458$ となる。なお、繰り返しになるが、実験ケース 10-4 は 10-4-4 以外場合には橋桁の前に全ての漂流物が停止する。桁下高が一番低い $hc=1\text{cm}(e=0.0146)$ の場合 (10-4, 12-4, 15-4) には、 $20.07\text{cm/s} \leq v_{ave}^1 \leq 42.79\text{cm/s}$ 及び $14.30\text{cm/s} \leq v_{ave}^3 \leq 24.8\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_p \leq 0.3472$ となり、 v_{ave}^1 と v_{ave}^3 が大きくなるに従って γ_p が高くなる傾向を示す。それより桁下高が高い $hc=2\text{cm}(e=0.0194)$ の場合 (9-3, 10-3, 12-3, 15-3) には、 $21.38\text{cm/s} \leq v_{ave}^1 \leq 63.67\text{cm/s}$ 及び $17.12\text{cm/s} \leq v_{ave}^3 \leq 44.4\text{cm/s}$ の領域で、 v_{ave}^1 が大きくなるに従って γ_p は高くなる傾向を示すが、 v_{ave}^3 と γ_p には明確な関連性が見られない。桁下高 $hc=3\text{cm}(e=0.0291)$ の場合 (9-2, 10-2, 12-2, 15-2) には、 $21.38 \leq v_{ave}^1 \leq 63.67$ 及び $17.12\text{cm/s} \leq v_{ave}^3 \leq 44.4\text{cm/s}$ の領域において、流速が相対的に低い段階より一定量の漂流物が橋桁の桁下空間や橋面上を通過し、その通過率 γ_p は横ばいに近い状態を示す。

これらを踏まえ、 v_{ave}^1 及び v_{ave}^3 と漂流物の通過率 γ_{pn} 及び γ_{pl} の関係に着目すると、 v_{max} との関係と基本的には同様の傾向を示す。特に、 v_{ave}^3 と γ_{pl} について、 $10.97\text{cm/s} \leq v_{ave}^3 \leq 44.43\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{pl} \leq 0.4813$ となり、 v_{max}

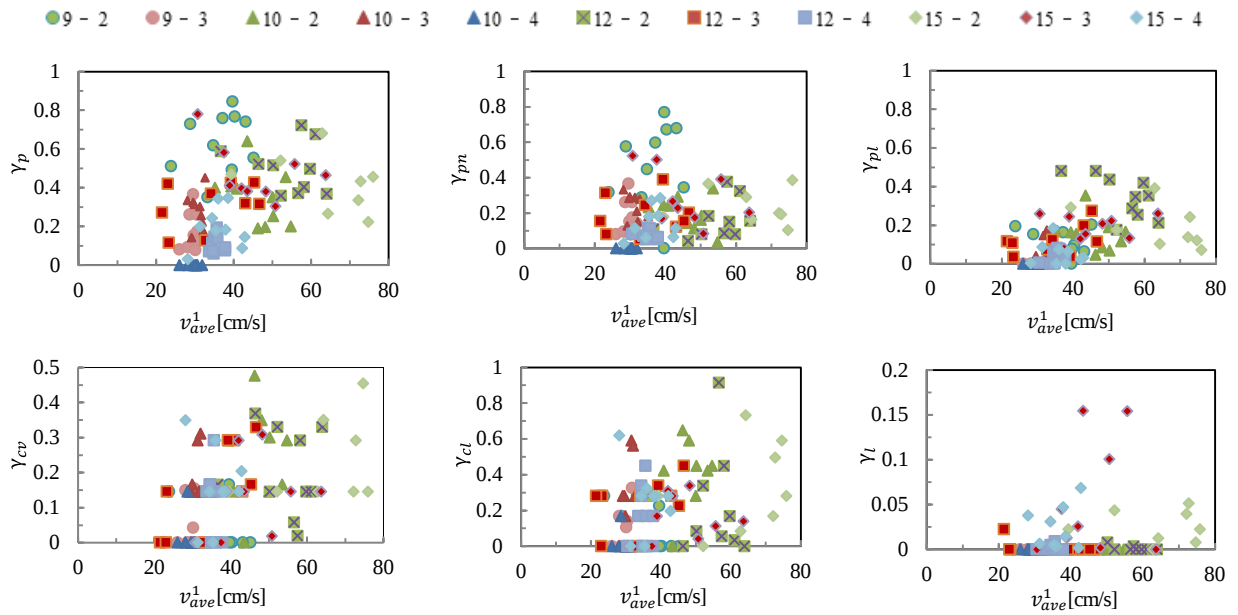


図-10 流速 1 秒間の時間平均 v_{ave}^1 と漂流物の通過率、閉塞率及び残留率の関係

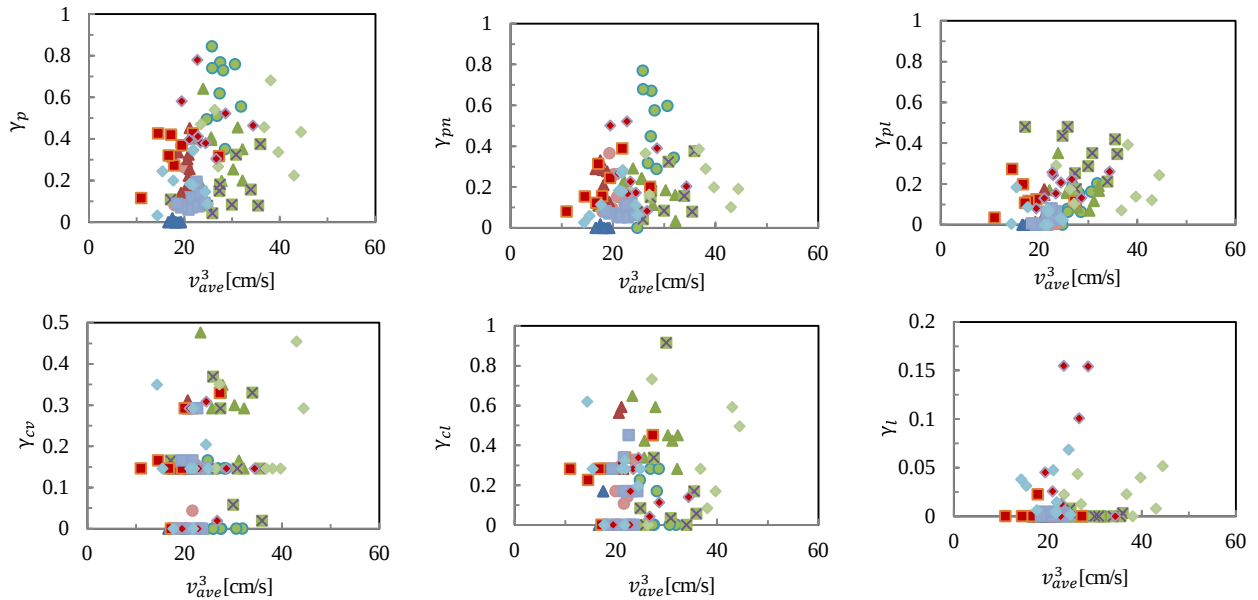


図-11 流速 3 秒間の時間平均 v_{ave}^3 と漂流物の通過率、閉塞率及び残留率の関係

及び v_{ave}^1 が上昇するに従って橋桁に衝突して流れた漂流物の通過率 γ_{pl} がより線形的に上昇する。

d) 流速 v_{ave}^1 及び v_{ave}^3 と漂流物の閉塞率 γ_{cv} , γ_{cl} 及び漂流物の残留率 γ_l の関係

図-10 と図-11 において、 v_{ave}^1 及び v_{ave}^3 と漂流物の体積の観点からの閉塞率 γ_{cv} の関係に着目すると、 $20.01\text{cm/s} \leq v_{ave}^1 \leq 75.89\text{cm/s}$ 及び $10.97\text{cm/s} \leq v_{ave}^3 \leq 44.43\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{cv} \leq 0.4757$ となる。 v_{max} と γ_{cv} の関係と同様に、 $\gamma_{cv}=0, 0.1458, 0.2916$ の 3 つの閉塞率に収束する。 また、 v_{ave}^1 及び v_{ave}^3 と漂流物の長さの観点からの閉塞率 γ_{cl} の関係に着目すると、 $20.01\text{cm/s} \leq v_{ave}^1 \leq 75.89\text{cm/s}$ 及び

$10.97\text{cm/s} \leq v_{ave}^3 \leq 44.43\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{cl} \leq 0.9154$ となり、 v_{max} との関係と調和的となる。

v_{ave}^1 及び v_{ave}^3 と残留率 γ_l の関係に着目すると、 $20.01\text{cm/s} \leq v_{ave}^1 \leq 75.89\text{cm/s}$ 及び $10.97\text{cm/s} \leq v_{ave}^3 \leq 44.43\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_l \leq 0.1881$ となる。 同様に、第 5 章(1) b) に先述した v_{max} と残留率 γ_l の関係と同様の傾向を示す。

(2) 津波波高及び波速と漂流物の通過率、閉塞率及び残留率の関係

a) 前面波高 a_f と漂流物の通過率 γ_p , γ_{pn} 及び γ_{pl} の関係

図-12 において、津波前面波高 a_f [cm] と漂流物の通過率 γ_p の関係に着目すると、 $3.11\text{cm} \leq a_f \leq 8.40\text{cm}$ の領域で

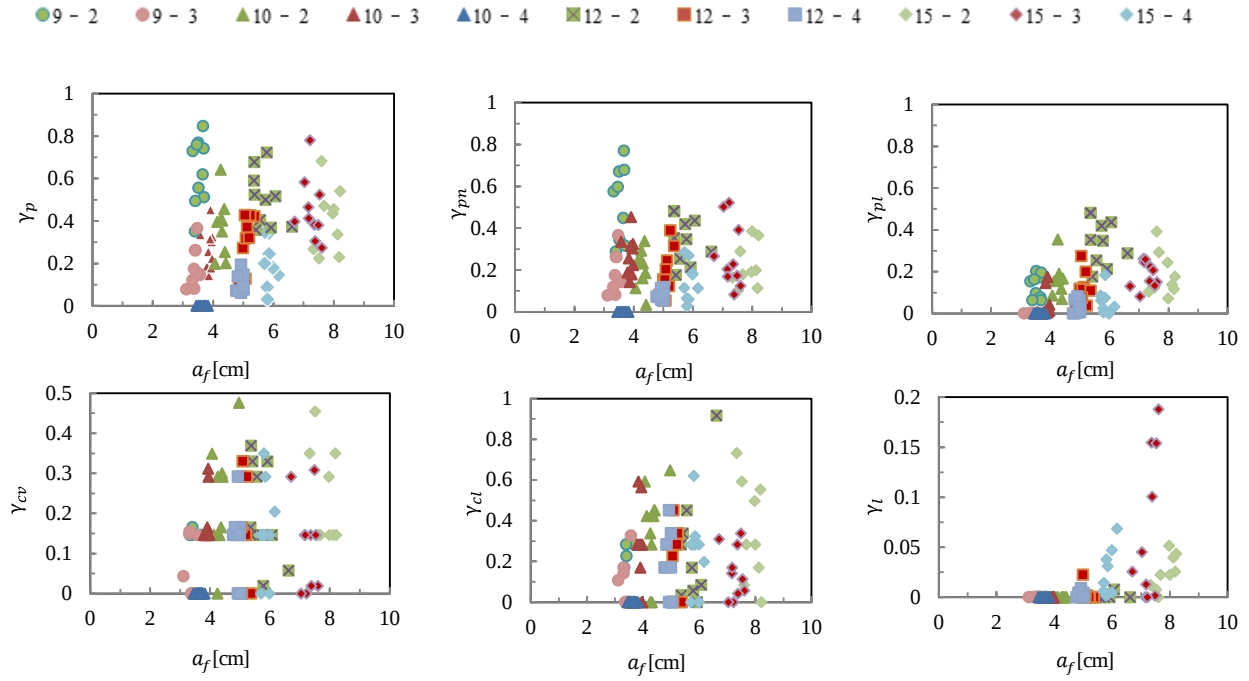


図-12 前面波高 a_f と漂流物の通過率，閉塞率及び残留率の関係

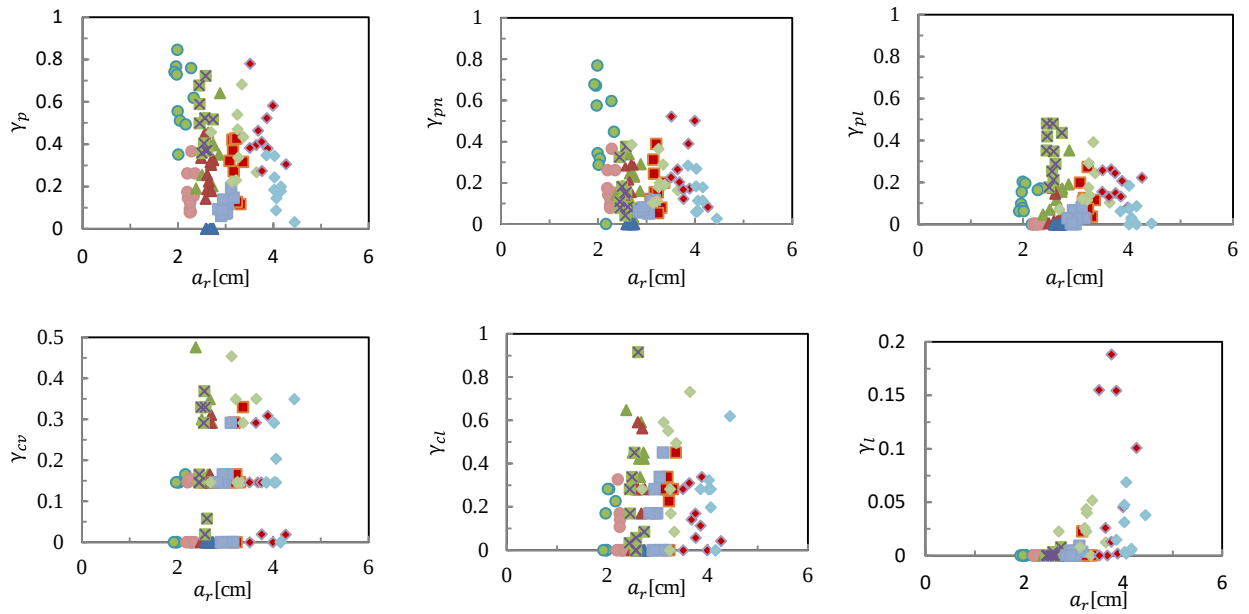


図-13 背面波高 a_r と漂流物の通過率，閉塞率及び残留率の関係

$0.00 \leq \gamma_p \leq 0.8458$ となる。桁下高が一番低い $hc=1\text{cm}(e=0.0146)$ の場合 (10-4, 12-4, 15-4) には, $3.44\text{cm} \leq a_f \leq 6.16\text{cm}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_p \leq 0.3472$ となり, 流速の場合と同様に a_f が大きくなるに従って基本的には γ_p は高くなる傾向が見られる。それより桁下高が高い $hc=2\text{cm}(e=0.0194)$ の場合 (9-3, 10-3, 12-3, 15-3) には, $3.11\text{cm} \leq a_f \leq 7.52\text{cm}$ の領域で $0.0775 \leq \gamma_p \leq 0.7802$ となり, a_f が大きくなるに従って γ_p は漸増する傾向が見られる。桁下高が最大となる $hc=3\text{cm}(e=0.0291)$ の場合 (9-2, 10-2, 12-2, 15-2) には, $3.32\text{cm} \leq a_f \leq 8.39\text{cm}$ の領域で $0.1904 \leq \gamma_p \leq 0.8458$ となり, この場合, 明確な関連性は見られない。

以上の通過率 γ_p の傾向を踏まえ, 流速の場合と同様に, 橋桁に衝突せずに流れた漂流物の通過率 γ_{pn} 並びに橋桁に衝突して流れた漂流物の通過率 γ_{pl} の内訳の観点から分析する。まず, a_f と橋桁に衝突せずに流れた漂流物の通過率 γ_{pn} の関係に着目すると, $3.11\text{cm} \leq a_f \leq 6.61\text{cm}$ の領域で $0 \leq \gamma_{pn} \leq 0.769$ となる。桁下高が一番低い $hc=1\text{cm}(e=0.0146)$ の場合 (10-4, 12-4, 15-4) には, $3.44\text{cm} \leq a_f \leq 6.16\text{cm}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{pn} \leq 0.2844$ となり, a_f が高くなるに従って γ_{pn} は高くなる傾向を示す。この場合より桁下高が高い $hc=2\text{cm}(e=0.0194)$ の場合 (9-3, 10-3, 12-3, 15-3) には, a_f が小さくなくても一定量の漂流物が

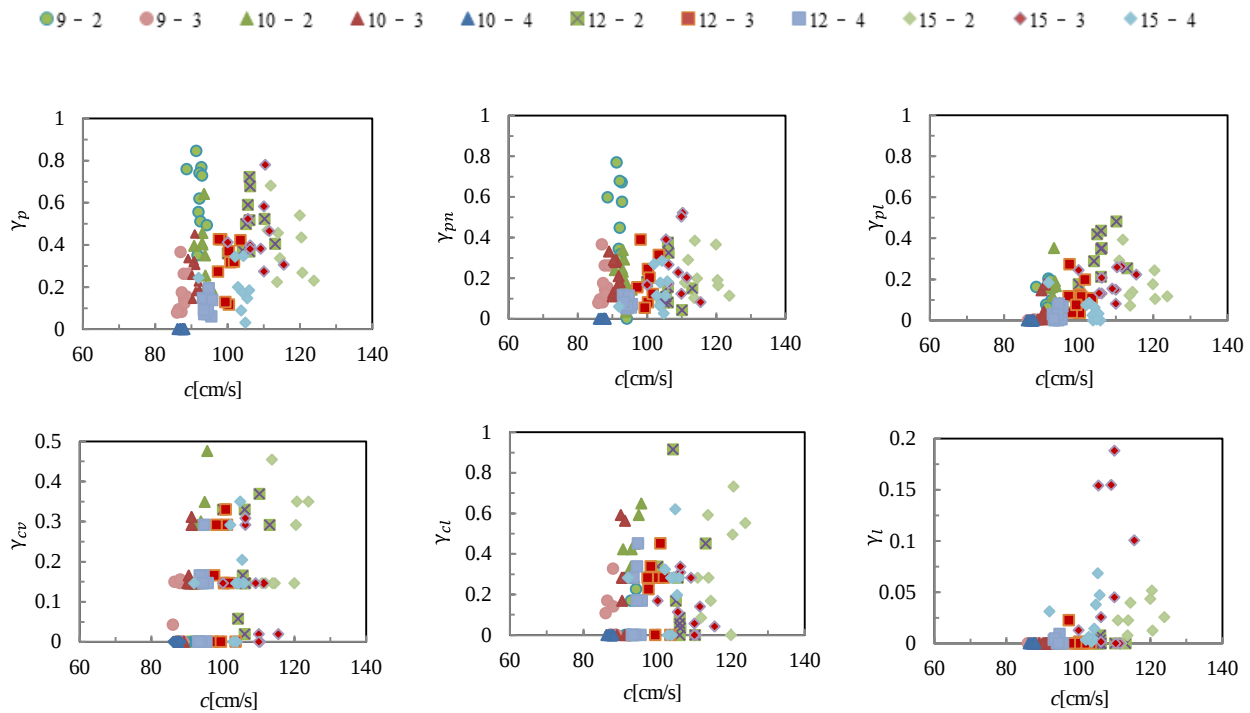


図-14 波速 c と漂流物の通過率，閉塞率及び残留率の関係

橋桁を通過し γ_{pn} の数値は横ばいの状態を保持する。 $hc=3\text{cm}(e=0.0291)$ の場合 (9-2, 10-2, 12-2, 15-2) には, a_f が大きくなると逆に, 橋桁に衝突せずに流れた漂流物のシェアは低くなる傾向を示す。

a_f と橋桁に衝突して流れた漂流物の通過率 γ_{pl} の関係に着目すると, $3.11\text{cm} \leq a_f \leq 8.40\text{cm}$ の領域で $0 \leq \gamma_{pl} \leq 0.4813$ となる。 $hc=1\text{cm}(e=0.0146)$ の場合 (10-4, 12-4, 15-4) 及び $hc=2\text{cm}(e=0.0194)$ の場合 (9-3, 10-3, 12-3, 15-3) には, a_f が高くなるに従って γ_{pl} は原則高くなる傾向が見られる。 $hc=3\text{cm}(e=0.0291)$ の場合 (9-2, 10-2, 12-2, 15-2) には, $3.68\text{cm} \leq a_f \leq 8.4\text{cm}$ の範囲で, $0.3471 \leq \gamma_{pl} \leq 0.4813$ となる。 $5.35\text{cm} \leq a_f \leq 6.05\text{cm}$ の前面波高 a_f が中領域においては, a_f が高くなると γ_p も高くなる傾向を示すが, $6.05\text{cm} \leq a_f \leq 8.4\text{cm}$ の相対的に波高が高い範囲では, a_f が高くなるに従って γ_{pl} は一定値に収束する傾向が見られる。

b) 前面波高 a_f と漂流物の閉塞率 γ_{cv} , γ_{cl} 及び漂流物の残留率 γ_l の関係

図-12において, a_f と漂流物の体積の観点からの閉塞率 γ_{cv} の関係に着目すると, $3.11\text{cm} \leq a_f \leq 8.4\text{cm}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{cv} \leq 0.4757$ となり, 第5章(1)b)及びd)において先述したように, $\gamma_{cv}=0, 0.1458, 0.2916$ の3つの閉塞率に収束する。また a_f と漂流物の長さの観点からの閉塞率 γ_{cl} の関係に着目すると, $3.11\text{cm} \leq a_f \leq 8.4\text{cm}$ の領域で, $0.00 \leq \gamma_{cl} \leq 0.9154$ となる。およそ4割合以上の実験ケースにおいて $0.1690 \leq \gamma_{cl} \leq 0.45$ の範囲の閉塞率を示す。

a_f と漂流物の残留率 γ_l の関係に着目すると, $3.11\text{cm} \leq$

$a_f \leq 8.4\text{cm}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_l \leq 0.1881$ となる。先述した流速との関係と同様に貯水部水位が $h_1=12\text{cm}$ の場合 (12-2, 12-3, 12-4) には, 漂流物が橋桁の橋面上に残留し始め, 貯水部水位が $h_1=15\text{cm}$ の場合 (15-2, 15-3, 15-4) には, およそ1割合以上の漂流物が橋桁の橋面上に残留する。

c) 背面波高 a_r と漂流物の通過率 γ_p , γ_{pn} 及び γ_{pl} の関係

図-13において, 津波背面波高 a_r [cm] と漂流物の通過率 γ_p の関係に着目すると, $1.92\text{cm} \leq a_r \leq 4.44\text{cm}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_p \leq 0.8458$ となる。桁下高が一番低い $hc=1\text{cm}(e=0.0146)$ の場合 (10-4, 12-4, 15-4) 及び桁下高が $hc=2\text{cm}(e=0.0194)$ の場合 (9-3, 10-3, 12-3, 15-3) には, それぞれ $2.59\text{cm} \leq a_r \leq 4.44\text{cm}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_p \leq 0.3472$, $2.19\text{cm} \leq a_r \leq 4.2\text{cm}$ の領域で $0.0775 \leq \gamma_p \leq 0.7802$ となり, 第5章(2)a)に先述した前面波高 a_f と γ_p の関係と同様に, a_r が高くなるに従って γ_p は高くなる傾向を示す。桁下高が最大となる $hc=3\text{cm}(e=0.0291)$ の場合 (9-2, 10-2, 12-2, 15-2) には, $1.92\text{cm} \leq a_r \leq 4.44\text{cm}$ の領域で $0.1904 \leq \gamma_p \leq 0.8458$ となるが, この場合には明確な関連性は見られない。

一方, 津波流速や前面波高 a_f の場合の傾向と異なり, 橋桁に衝突せずに流れた漂流物の通過率 γ_{pn} 並びに橋桁に衝突して流れた漂流物の通過率 γ_{pl} の内訳については, 背面波高 a_r の指標では明確な関連性を見出すことができなかった。

d) 背面波高 a_r と漂流物の閉塞率 γ_{cv} , γ_{cl} 及び漂流物の残留率 γ_l の関係

図-13において, a_r と漂流物の体積の観点からの閉塞率 γ_{cv} の関係に着目すると, $1.92\text{cm} \leq a_r \leq 4.44\text{cm}$ の領域で

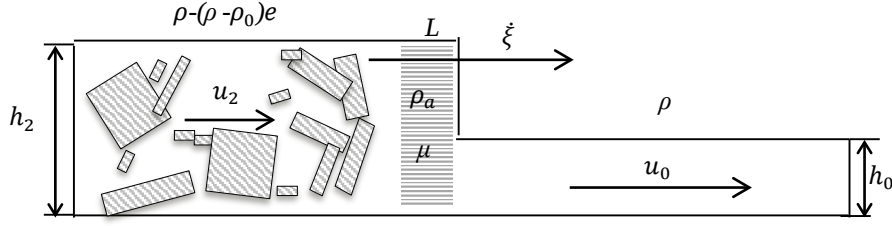


図-15 漂流物を伴う波の先端部のモデル

$0.00 \leq \gamma_{cv} \leq 0.4757$ となり、同様に $\gamma_{cv}=0, 0.1458, 0.2916$ の3つの閉塞率に収束する。また、 a_r と漂流物の長さの観点からの閉塞率 γ_{cl} 及び漂流物の残留率 γ_l の関係に着目すると、 $1.92\text{cm} \leq a_r \leq 4.44\text{cm}$ の領域で、それぞれ $0.00 \leq \gamma_{cl} \leq 0.9154$ 及び $0.00 \leq \gamma_l \leq 0.1881$ となり、第5章(2)b)に先述した傾向と同様の傾向を示す。

e) 波速 c と漂流物の通過率 γ_p 、 γ_{pn} 及び γ_{pl} の関係

図-14において、津波波速 $c[\text{cm/s}]$ と漂流物の通過率 γ_p の関係に着目すると、 $85.97\text{cm/s} \leq c \leq 123.81\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_p \leq 0.8458$ となり、津波流速との関係と同様の傾向を示す。橋桁に衝突せずに流れた漂流物の通過率 γ_{pn} 並びに橋桁に衝突して流れた漂流物の通過率 γ_{pl} の内訳については、まず、 γ_{pn} との関係に着目すると、 $85.97\text{cm/s} \leq c \leq 123.81\text{cm/s}$ の領域で $0.00 \leq \gamma_{pn} \leq 0.769$ となる。特に、波速 c が相対的に低い場合には、実験ケース9-2において $88.67\text{cm/s} \leq c \leq 92.72\text{cm/s}$ の領域で $0.4477 \leq \gamma_{pn} \leq 0.7690$ となり、上向きの値を示す。この以外の波速 c の領域では、一定量の漂流物が橋桁に衝突せずに通過するため、 γ_{pn} はほぼ横ばいの値となる。一方、 γ_{pl} との関係に着目すると、 $86.09\text{cm/s} \leq c \leq 123.81\text{cm/s}$ の領域において $0.00 \leq \gamma_{pl} \leq 0.4813$ となり、相対的に波速 c が低い領域である $86.09\text{cm/s} \leq c \leq 103.50\text{cm/s}$ の領域では、 c が速くなるに従って $0.00 \leq \gamma_{pl} \leq 0.3528$ は全体的に高くなる傾向を示す。 $103.50\text{cm/s} \leq c \leq 123.81\text{cm/s}$ の相対的に c が高い領域では、 $0.00 \leq \gamma_{pl} \leq 0.4813$ になり明確な関連性は見られなかった。

f) 波速 c と漂流物の閉塞率 γ_{cv} 、 γ_{cl} 及び漂流物の残留率 γ_l の関係

図-14において、津波波速 c と漂流物の体積並びに長さの観点からの閉塞率 γ_{cv} 、 γ_{cl} 及び漂流物の残留率 γ_l の関係に着目すると、 $85.97\text{cm/s} \leq c \leq 123.81\text{cm/s}$ の領域でそれぞれ $0.00 \leq \gamma_{cv} \leq 0.4757$ 、 $0.00 \leq \gamma_{cl} \leq 0.9154$ 及び $0.00 \leq \gamma_l \leq 0.1881$ となり、上記と同様に、津波流速との関係と同様の傾向を示す。

6. 理論的考察

図-6に示したStokerのモデルに基づき、波の先端部

及び静水部を抽出し、本実験における橋桁への津波漂流物の作用をモデル化すると、図-15に示ようになる。

図-15は、表-1に示す漂流物の密度と断面サイズのもと、実験ビデオデータに基づき漂流物の運動状況を観察することで、漂流物の高さ($10 \leq h \leq 27[\text{mm}]$)と静水深 h_0 ($20 \leq h_0 \leq 40[\text{mm}]$)の関係や漂流物間の相互の影響、及び、漂流物と水路底面の相互作用を定性的に捉えた状態を示している。本モデルにおける質量保存則は次式となる。

$$\{\rho - (\rho - \rho_0)e\}h_2(\xi - u_2) = \rho h_0(\xi - u_0) \quad (9)$$

ここで、 ρ は水路中の流体の密度、 ρ_0 は漂流物の密度、 e は式(3)で定義した漂流物の占有率、 h_2 は波の先端部の水深、 h_0 は静水深、 ξ は波の伝播速度、 u_2 は波の先端部における上流域の流速、 u_0 は波の先端部における下流域の流速（一般には零）である。なお、式(9)において、 $\rho = \rho_0$ とすれば、理想段波理論の質量保存則となる。

漂流物間の摩擦による漂流物間の相互作用を考慮すれば、摩擦係数 μ_0 は静止摩擦として考えられ、本研究では $\mu_0 = 1.0$ とする。また、漂流物と水路底面の相互作用も摩擦によるものとし、その摩擦係数を μ とする。摩擦係数 μ は μ_0 を含んだ合成摩擦係数と捉えるべきものである。よって、漂流物と水路底面の相互作用を合成摩擦力 f_a として次式のようにモデル化する。

$$f_a = \mu \rho_a g L h_2 \quad (10)$$

ここでは、松富ら⁸⁾による合成摩擦力の計算方法を参考にし、 $\rho_a (= \rho \sim \rho_0)$ は波の先端部における漂流物域層の密度、 g は重力加速度、 L は漂流物域層の長さである。本モデルにおける運動量保存則は次式となる。なお、次式において、 $\rho = \rho_0 = \rho_a$ かつ $L = 0$ とすれば、理想段波理論の運動量保存則となる。

$$\begin{aligned}
& \{\rho - (\rho - \rho_0)e\}h_2(\xi - u_2)u_2 \\
& - \rho h_0(\xi - u_0)u_0 \\
& = \frac{1}{2}\{\rho - (\rho - \rho_0)e\}gh_2^2 \\
& - \frac{1}{2}\rho gh_0^2 - \mu\rho_a gLh_2
\end{aligned} \quad (11)$$

以上、式(9)の質量保存則と式(11)の運動量保存則から、上流域の流速 u_2 と波の伝播速度 ξ は各々次式のように求められる。

$$\begin{aligned}
u_2 &= u_0 + \\
& \left[\frac{\frac{1}{2}\{\rho - (\rho - \rho_f)e\}gh_2^2 - \frac{1}{2}\rho gh_0^2 - \mu\rho_a gLh_2}{\rho h_0(\xi - u_0)} \right]
\end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
\xi &= u_0 + \\
& \sqrt{\frac{\{\rho - (\rho - \rho_0)e\}gh_2}{2\rho h_0}} \\
& - \sqrt{\frac{\mu\rho_a gLh_2^2\{\rho - (\rho - \rho_0)e\}}{\rho h_0[\{\rho - (\rho - \rho_0)e\}h_2 - \rho h_0]}}
\end{aligned} \quad (13)$$

上式で導出した上流域の流速 u_2 と波の伝播速度 ξ を検証するために、漂流物域層の長さ L と波の先端部の水深 h_2 を測定する水理実験を今後行う予定である。

7. 結論

本研究では、断面のサイズと長さが異なる6種類の直方体角柱で津波漂流物を模擬し、水理実験を行なうことで、橋桁に作用する津波漂流物の動態を明らかにした。橋桁に対する漂流物の通過率及び漂流物の閉塞率に関する6つのパラメータを定義して、それらと津波流速、橋桁の前面波高 a_f 及び背面波高 a_r との関係を明らかにした。また、既往の研究において示されているダムの崩壊流れの理論汎濫流速 u_2 と実験値との比較を行なうなどして、実験データに対する理論的な考察を行なった。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 津波作用の諸量の中で、本現象に係る説明性が最も高かったのは津波流速のピーク値 v_{max} であった。
- (2) 漂流物の橋桁に対する通過率 γ_p については、桁下高 hc が相対的に低い場合において、 v_{max} が大きくなるに従って γ_p が高くなる傾向が見られた。この場合には橋

桁に衝突せずに流れた漂流物と橋桁に衝突して流れた漂流物のシェアがほぼ拮抗する。桁下高 hc が高くなると、 v_{max} が大きくなるに従って、一定量の漂流物が橋桁に衝突せずに流れるものの、橋桁に衝突して流れる漂流物のシェアが高まり、漂流物全体としての通過率 γ_p も高まる結果となる。

- (3) 一方、逆の漂流物の橋桁に対する閉塞現象に関しては、体積の観点からの閉塞率が $\gamma_{cv}=0, 0.1458, 0.2916$ のおよそ3つの値に収束した。これは、重量及び体積の観点から最も大きな漂流物6番が橋桁に1つあるいは2つ詰まった場合に相当し、橋桁のスケールに対して大きな漂流物の閉塞が閉塞率全体を支配することを意味する。また、長さの観点からの閉塞率 γ_{cl} については、4割以上の実験ケースにおいて $0.1690 \leq \gamma_{cl} \leq 0.45$ の領域の値になることが明らかとなった。
- (4) 漂流物の橋面上の残留率 γ_l については、貯水部水位 h_1 が徐々に高まり流量が大きくなると、漂流物が橋桁の橋面上に残留し始め、特に、桁下高 hc が最も高い場合において重量及び体積の観点から相対的に小さく細長い漂流物が橋面上におよそ1割から2割前後残留することとなる。
- (5) 津波流速と波高に対する漂流物の影響について、Stokerの理論値を算定し考察した結果、静水深 h_0 が低い場合には、 v_{max} は全般的にStokerの理論値より小さくなり、静水深 h_0 が高い場合には逆に、 v_{max} は全般的にStokerの理論値より小さくなった。

謝辞：水理実験及びビデオデータ処理に際しましては、筑波大学大学院システム情報工学研究科の修了生である原昌弘氏、水越湧太氏及び中嶋千穂子氏、並びに、同研究科博士前期課程生である寺寫幹裕氏、畠山大治氏及び山本鐘太氏に多大なご協力を頂きました。また、鳥取大学の小野祐輔先生並びに千葉大学の丸山喜久先生には本実験内容に係る貴重なご助言を賜りました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献：

- 1) 庄司学, 森洋一郎：桁橋の津波被害再現実験, 海岸工学論文集, 土木学会, 第53巻, pp.801-805, 2006.
- 2) 土木学会・地震工学委員会：東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書, 第II編, 津波被害分析WG最終報告書, 2015.
- 3) 庄司学, 嶋原良典, 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, 第16巻, 第8号, pp.8_88-8_109, 2016.
- 4) Xing, C. and Kosa, K. : Effects of turbulence model on the reproduction of CADMAS when solitary wave applied on girder, 橋梁の対津波設計に関するシンポジウム論文

- 集, 土木学会, pp.5-8, 2017.
- 5) Xing, C. and Kosa, K. : Study about the relationship between hydrostatic pressure and wave pressure applied on girder, 橋梁の対津波設計に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.9-12, 2017.
 - 6) 菊地俊紀, 菅波慎吾, 丸山喜久, 庄司学 : 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, 土木学会 37 回地震工学研究発表会, 2017.
 - 7) 中村雅志, 小野祐輔, 庄司学 : 粒子法を用いた橋梁構造物に作用する津波波力の評価, 橋梁の対津波設計に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.13-14, 2017.
 - 8) 松富英夫, 藤井碧, 山口健 : 漂流物を伴う氾濫流の基礎実験とモデル化, 海岸工学論文集, 土木学会, 第54 卷, pp.226-230, 2007.
 - 9) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸, 伊藤丹 : 波状段波により輸送される河道内氷版の挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, pp.919-924, 2013.
 - 10) 嶋原良典, 許松, 多田毅 : 津波漂流物モデルの現地スケール問題への適用に関する考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.427-432, 2016.
 - 11) 許松, 嶋原良典, 多田毅, 林建二郎 : 津波による船舶群の漂流・座礁に関する水理実験と数値モデルの検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.277-282, 2015.
 - 12) 庄司学, 森山哲雄, 藤間功司, 嶋原良典, 笠原健治 : 単径間橋桁に作用する砕波津波の荷重に関する実験的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.55A, pp.460-470, 2009.
 - 13) Stoker, J.J. : The formation of breakers and bores, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 1, pp.1-87, 1948.
 - 14) 松富英夫, 榊山勉, Sindhu Nugroho, 都司嘉宣, 谷岡勇市郎, 西村裕一, 鎌滝孝信, 村上嘉謙, 松山昌史, 栗塚一範 : Banda Aceh と周辺における 2004 年インド洋津波と被害想定からみた課題, 海岸工学論文集, 土木学会, 第52 卷, pp.1366-1370, 2005.

EXPERIMENTAL STUDY ASSOCIATED WITH TSUNAMI FLOATING BODIES ACTING ON A BRIDGE DECK

Gaku SHOJI, Xiaojiao LIU and Minoru IIDAKA

Authors carried out hydraulic experiments to clarify the dependency of passage rate, blocked rate and residual rate of tsunami floating bodies to or on a bridge deck upon tsunami peak velocity and tsunami averaged velocity, and inundation front height and rear height of a bridge deck. The share of passage rate of tsunami floating bodies with impact to a bridge deck and without impact of a bridge deck when tsunami peak velocity increases was clarified and in contrast physical mechanism on blocked rate of tsunami floating bodies to a bridge deck was discussed. In addition, residual rate of tsunami floating bodies on a bridge deck was found to become about 10% - 20% which is dominant of relatively small-sized tsunami floating bodies when tsunami peak velocity becomes high.