

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、水理模型実験を通じ、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を考察し、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_{cv} 、 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汎濫流速 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⁾。

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⁵⁾は漂流物を伴う汎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⁶⁾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。

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

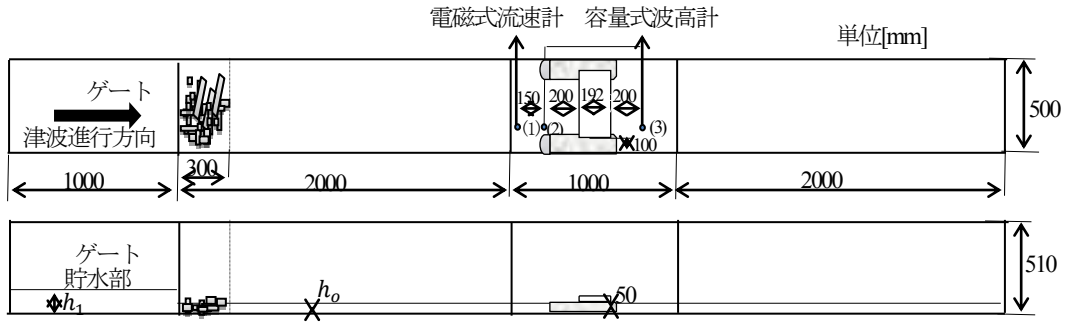


図-1 実験水路及び模型設置状況

表-1 津波漂流物模型

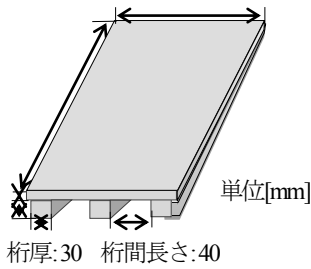


図-2 橋桁模型

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	◆

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氾濫流速 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。さらに、後述するStokerのモデル¹³⁾を踏まえ、橋桁への津波漂流物の作用を理論的に検証するため、ビデオカメラを橋桁重心の真上と漂流物群の配置位置からの側面に設置(上:CANON製DM-XV1,側面:NIKON製COOLPIX AW100)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。

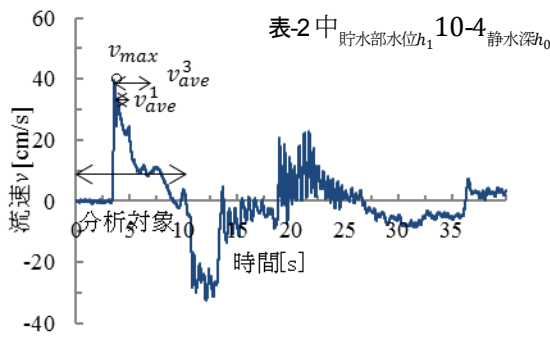


図-3 津波流速の時系列(漂流物有りの場合のデータ)

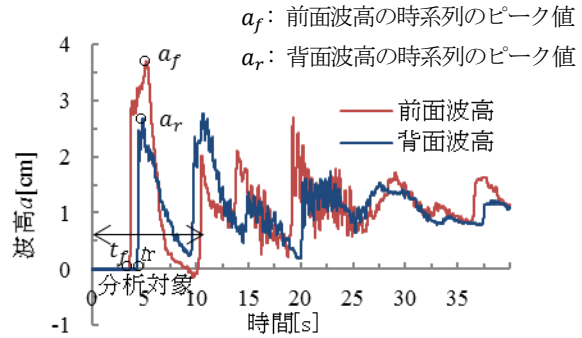


図-4 津波波高の時系列(漂流物有りの場合のデータ)

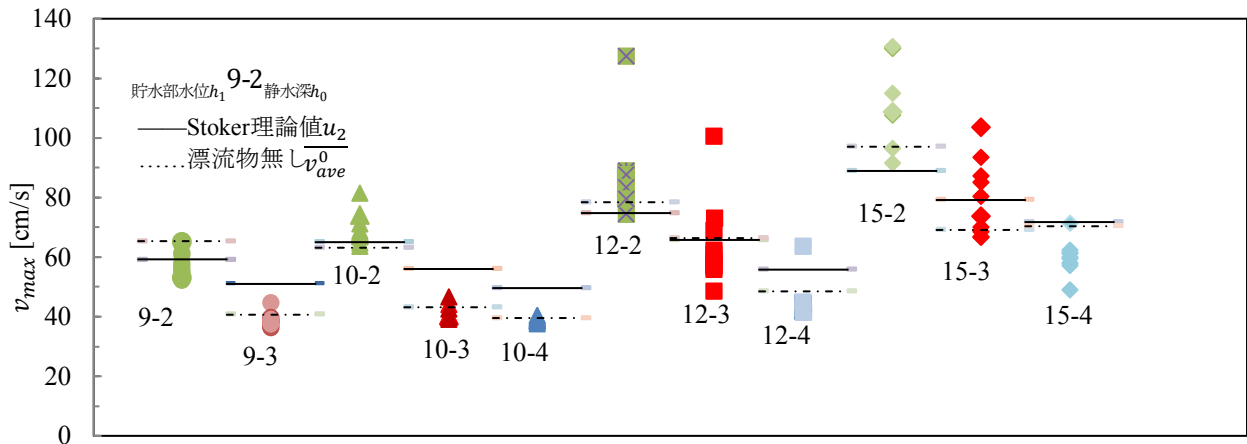


図-5 流速のピーク値 v_{max} と貯水部水位 h_1 及び静水深 h_0 の関係

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 le 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。津波漂流物は船舶、車輛、自転車、流木及び倒壊した建物に伴う瓦礫などであることを念頭に入れ、それらの実物の長さを 1m から 8m までと想定して橋桁模型と同じ比率である 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⁸⁾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ランダムにゲートから 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定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. 津波流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 $v_{max} [\text{cm/s}]$ と定義した。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、津波流速の時系列とビデオ解析結果を比較して、

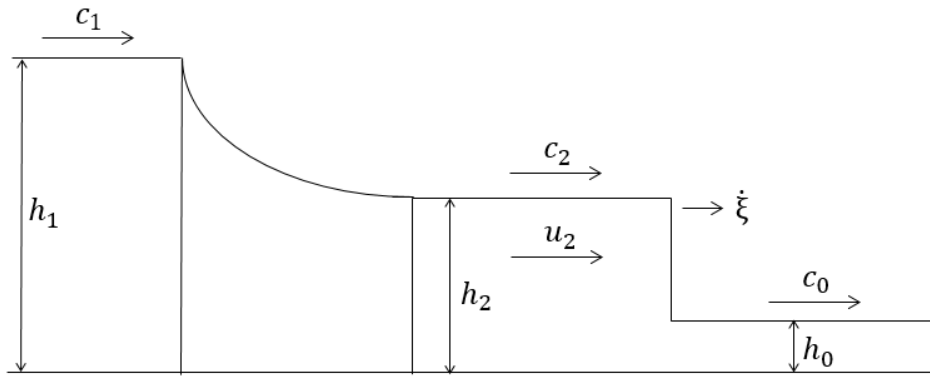


図-6 Stokerモデル¹³⁾

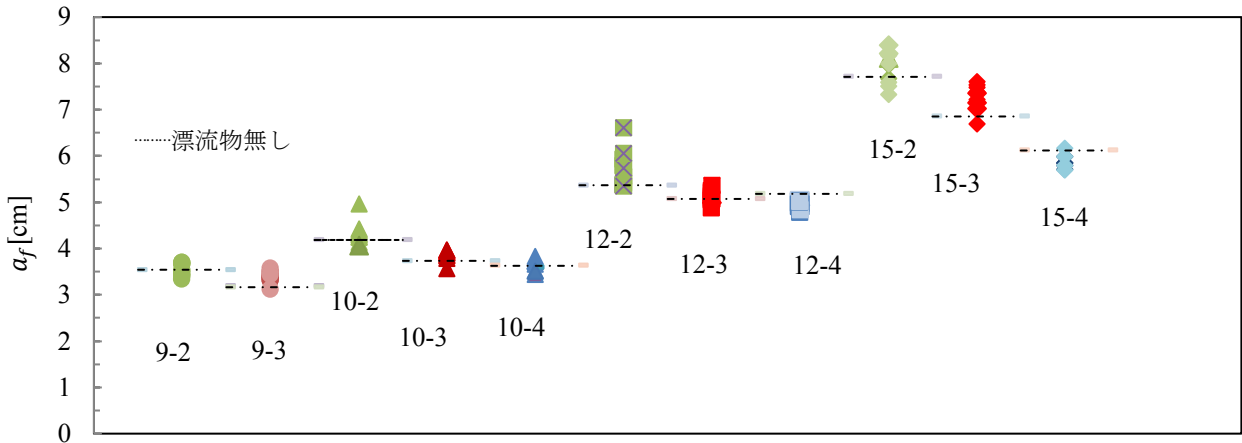


図-7 前面波高 a_f と貯水部水位 h_1 及び静水深 h_0 の関係

v_{max} の時刻の整合性を確認した上で、 v_{max} 以降の3秒までの準定常的な区間における流速を定義する観点から、 v_{max} を示した直後の1秒間並びに3秒間の時間平均を $v_{ave}^1[cm/s]$ 、 $v_{ave}^3[cm/s]$ と定義する。

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。

$$c = \frac{L_{r-f}}{t_r - t_f} \quad (1)$$

ここで、 L_{r-f} 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、 $L_{r-f}=59.2\text{ cm}$ 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 $h_1=9\text{ cm}$ 、静水深 $h_0=2\text{ cm}$ という実験条件を表わしている。また、漂流物無しの場合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。

さらに、漂流物無しの場合においては、Stoker¹³⁾によ

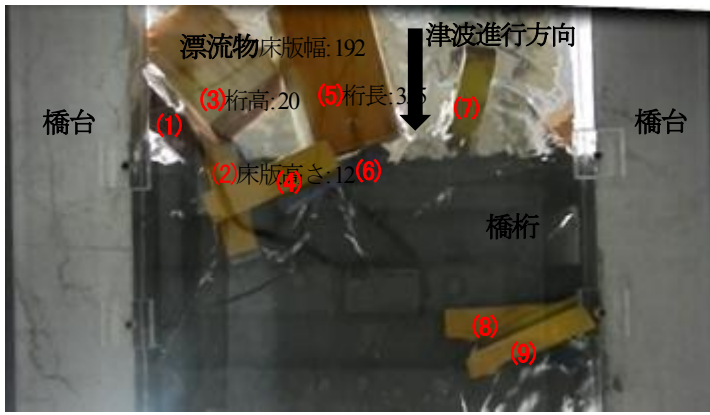
るダム崩壊流の理論汜濫流速 u_2 と比較するために、その理論値 u_2 を図-5に実線で表している。なお、Stokerの理論においては、瞬時的にダムブレイクするという条件のもと、ダムの崩壊流れに対する問題をモデル化して、ダムの上流域水深 h_1 と下流域水深 h_0 から理論汜濫流速 u_2 を得る。ダム崩壊直後の時刻における、Stokerのモデルを図-6に示す。これによれば、ゲート急開直後の流れ場において、波の先端部の上流域の流速 u_2 に対して以下の関係式を得る。

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

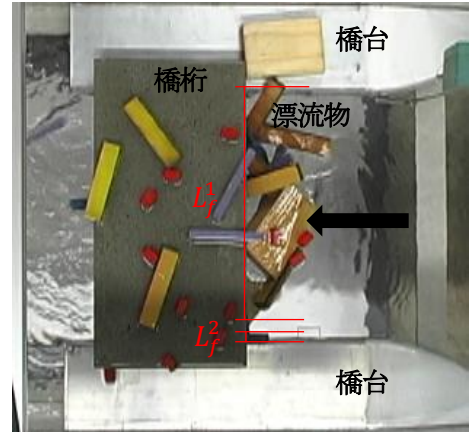
ここで、 c_i は水深 h_i での波速で、次式により求められる。

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

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。



(a) 体積の観点からの閉塞率 γ_{cv} の定義



(b) 長さの観点からの閉塞率 γ_{cl} の定義

写真-1 閉塞率の定義

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

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

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。本実験結果においては、漂流物の材質が同一であるものの、静水深の違いにより混相の状態が異なるため、実験値とStokerの理論値との大小関係は上述のように異なる。

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、漂流物無しの場合において、前面波高の3回の平均値 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、明らかな傾向は見られない。

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、第2章の実験方法で述べた通り、図-3及び図-4において、反射波が橋桁に到達するまでのおよそ10秒間を分析対象として漂流物の動態を観察した。

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る漂流物の体積、 V_{pl} は橋桁に衝突して流れる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全体積である。例えば、**写真-1(a)**に示すように、橋桁の前面部及び橋桁の桁下空間に(1)-(9)まで 9 個の漂流物が閉塞している。反射波が橋桁に到達する前に、この状態がおよそ 2 秒間維持され、桁下空間に詰まった漂流物の全体積を V_{cv} と定義する。

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、**写真-1(b)**に示すように、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全長さを採用する。

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

図-8 から**図-10** には、津波流速 v_{max} 、 v_{ave}^1 及び v_{ave}^3 と漂流物の通過率、閉塞率及び残留率の関係を示す。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について、上記の流速に関わる 3 つのパラメータにより同様にメカニズムを説明することでき、それらの中で、 v_{max} による説明性が最も高いと判断された。以上より、 v_{ave}^1 及び v_{ave}^3 との関係を**図-8**と**図-9**に掲載するものの、本章においては、 v_{max} と漂流物の通過率、閉塞率及び残留率の関係のみを論じる。

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(a)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 の關係に着目すると、桁下高が一番低い $h_c=1\text{cm}(e=0.0117)$ 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 $0.015 \leq \gamma_p \leq 0.347$ となる。**図-1**に示すように、漂流物を混合して漂流物群としてランダムに静水部に配置するため、津波の流れ場における、漂流物群の動態は大きくばらつくことから、10 回の同じ実験条件においても v_{max} と γ_p の結果は大きければつきを示す。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た。それ以外のデータにおいては、 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 $h_c=2\text{cm}(e=0.0156)$ 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 $0.078 \leq \gamma_p \leq 0.780$ となり、 $h_c=1\text{cm}$ 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 $h_c=3\text{cm}(e=0.0235)$ 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 $0.190 \leq \gamma_p \leq 0.846$ となり、流速が低い段階から極めて速い段階まで、通過率 γ_p はばらついてはいるが、 v_{max} が大きくなると全体として γ_p は高くなる傾向を示す。

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る漂流物の通過率 γ_{pl} の内訳の観点から分析する。

まず、**図-8(b)**において、橋桁に衝突せずに流れる漂流物の通過率 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 γ_{pn} は 0.769 までとなる。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、54.78cm/s

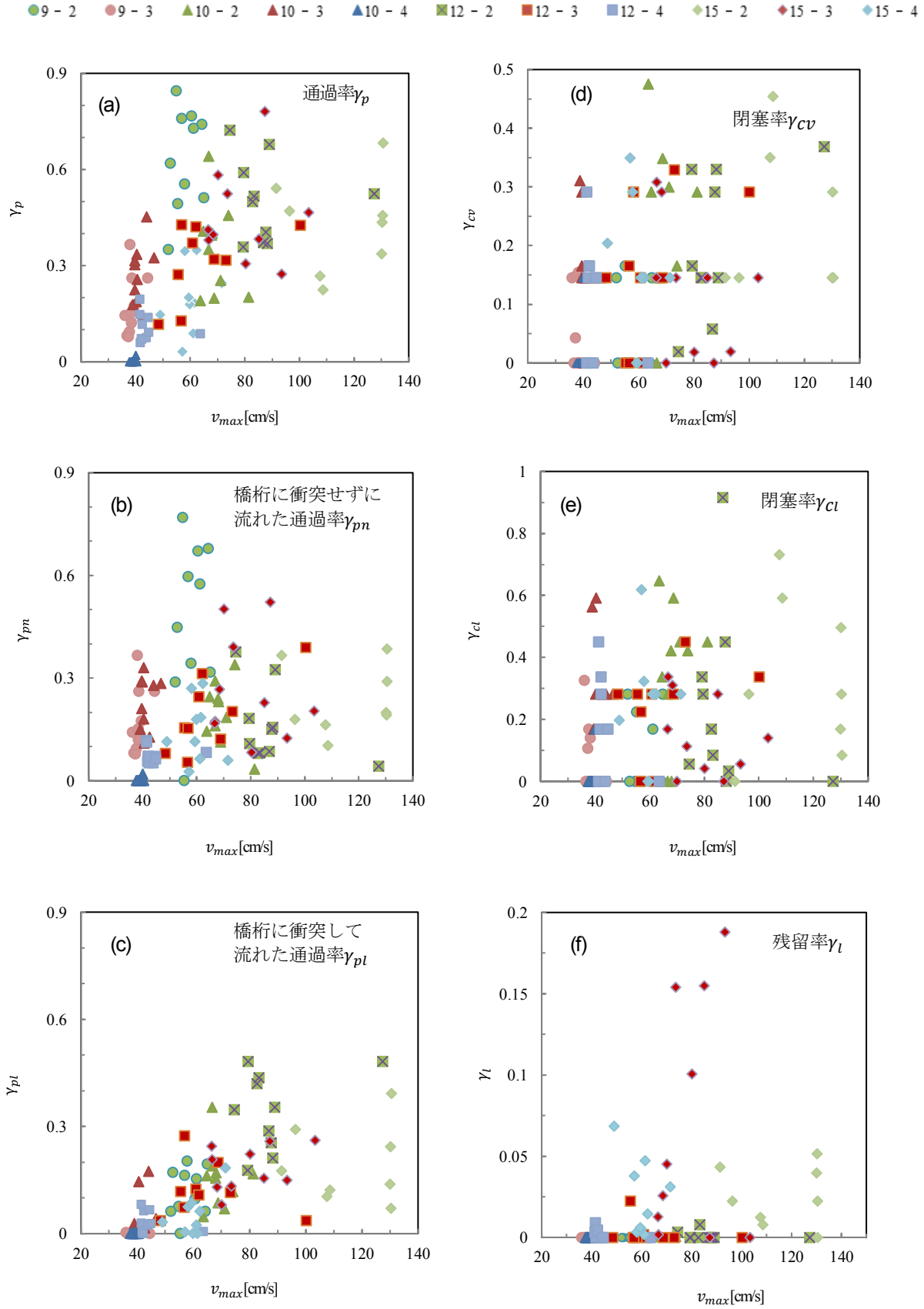


図-8 流速の最大値 v_{max} と漂流物の通過率, 閉塞率及び残留率の関係

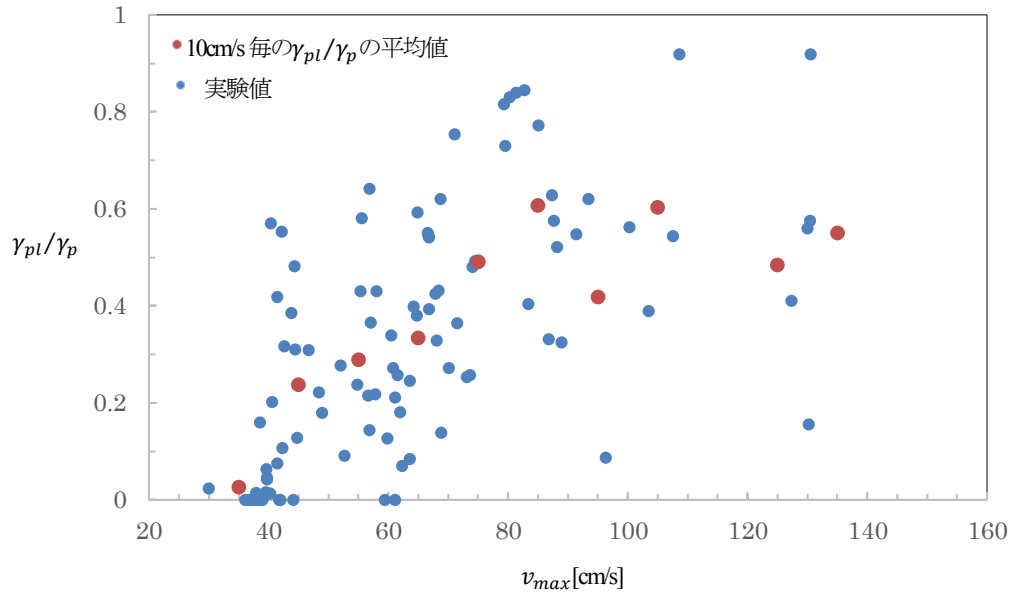


図-9 橋桁の桁下空間や橋面上に通過した漂流物に対する、橋桁に衝突して流れる漂流物の割合 γ_{pl}/γ_p と流速の最大値 v_{max} の関係

$\leq v_{max} \leq 64.86\text{cm/s}$ の領域で $0.575 \leq \gamma_{pn} \leq 0.769$ となる。また、桁下高が一番低い $h_c=1\text{cm}(e=0.0117)$ 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 γ_{pn} は 0.284 となり、 v_{max} が大きくなるに従って γ_{pn} は高くなる傾向を示す。この場合より桁下高が高い $h_c=2\text{cm}(e=0.0156)$ 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 $0.053 \leq \gamma_{pn} \leq 0.522$ となり、 v_{max} と γ_{pn} の関係は大きいばらつきを示す。桁下高が最大となる $h_c=3\text{cm}(e=0.0235)$ 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 γ_{pn} は 0.769 までとなり、実験ケース 15-2 の一部のデータを除いて、 v_{max} が大きくなるに従って全体的には γ_{pn} が小さくなる傾向を示す。

一方、図-8(c)において、橋桁に衝突して流れる漂流物の通過率 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 γ_{pl} は 0.481 までとなる。桁下高が一番低い $h_c=1\text{cm}(e=0.0117)$ 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る漂流物の通過率 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 $h_c=2\text{cm}(e=0.0156)$ 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る漂流物の通過率 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 $h_c=3\text{cm}(e=0.0235)$ 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る漂流物の割合 γ_{pl}/γ_p を図-9のように算出した。また、 v_{max} に対して γ_{pl}/γ_p の10cm/s毎の平均値を計算し、図-9に併せてプロットしている。

$36.04\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 83.30\text{cm/s}$ 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。その中に、流速が相対的に低い $36.04\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 66.76\text{cm/s}$ 領域では、一部のデータを除いて、衝突して流れる漂流物の割合 γ_{pl}/γ_p は 0.5 には至らない。10cm/s 毎の平均値も 0.4 まで至らない。すなわち、橋桁に衝突して流れる漂流物より、衝突せずに流れる漂流物の割合が大きいことを意味する。 $79.52\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 83.30\text{cm/s}$ の流速が相対的に高い領域では、 γ_{pl}/γ_p の平均値が 0.4 を超えて 0.6 までの範囲で示す。 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。

以上より、 v_{max} と γ_p 、 γ_{pn} 及び γ_{pl} の関係について、 v_{max} が低い場合には、 v_{max} が大きくなるに従って γ_p も大きくなり、その際、 γ_{pn} 及び γ_{pl} の両方が大きくなっている。また、その場合には、橋桁に衝突せずに桁下空間を通過した漂流物が多く、 γ_{pn} の割合が大きくなる。さらに v_{max} が大きくなると、 γ_p はばらつくものの、 v_{max} が大きくなるに従って γ_{pn} が小さくなり、逆に γ_{pl} はさらに高くなる、その場合には、橋桁に衝突せずに流れた漂流物より、衝突して流れた漂流物のシェアが高くなる。

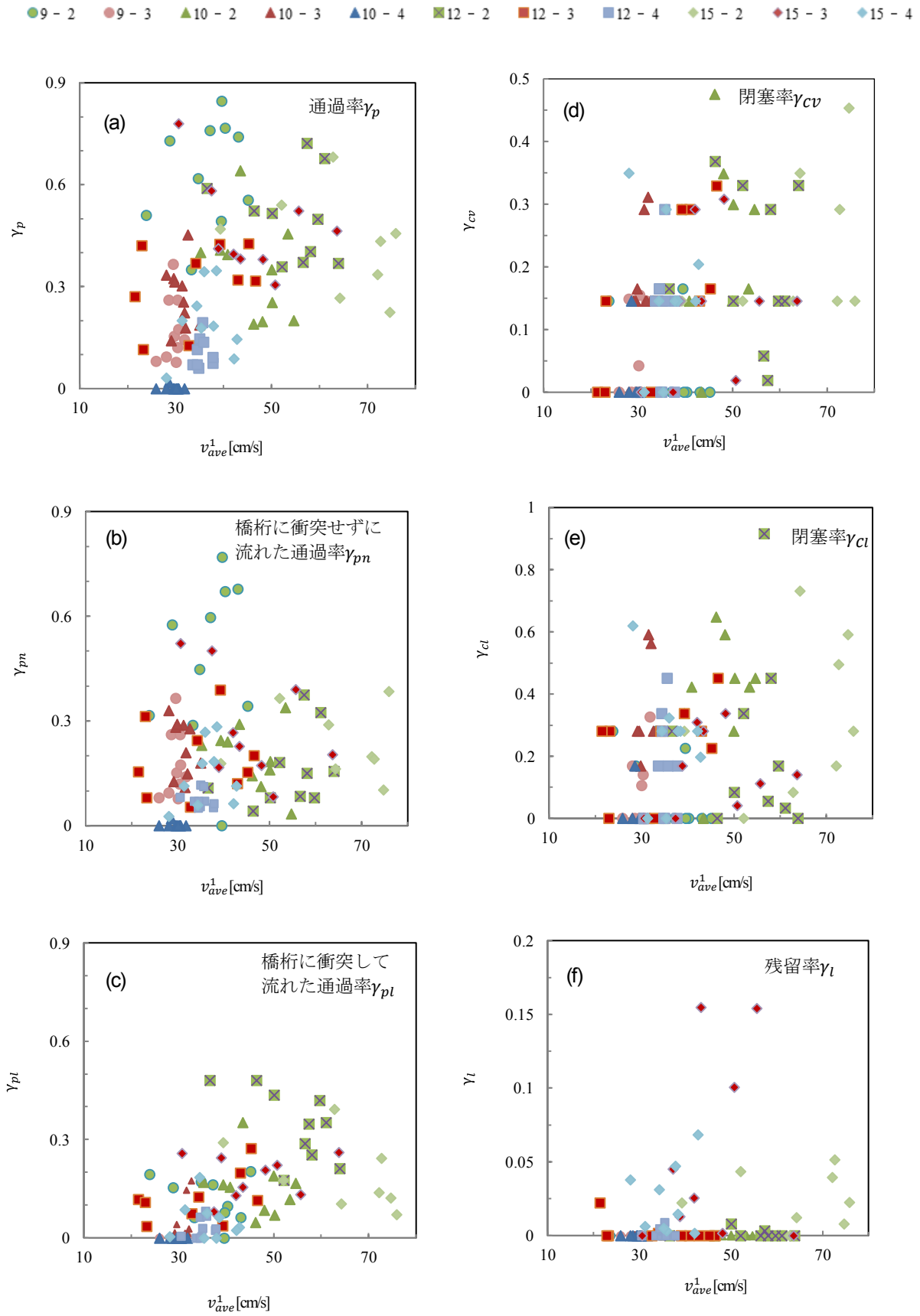


図-10 流速 1 秒間の時間平均 v_{ave}^1 と漂流物の通過率, 閉塞率及び残留率の関係

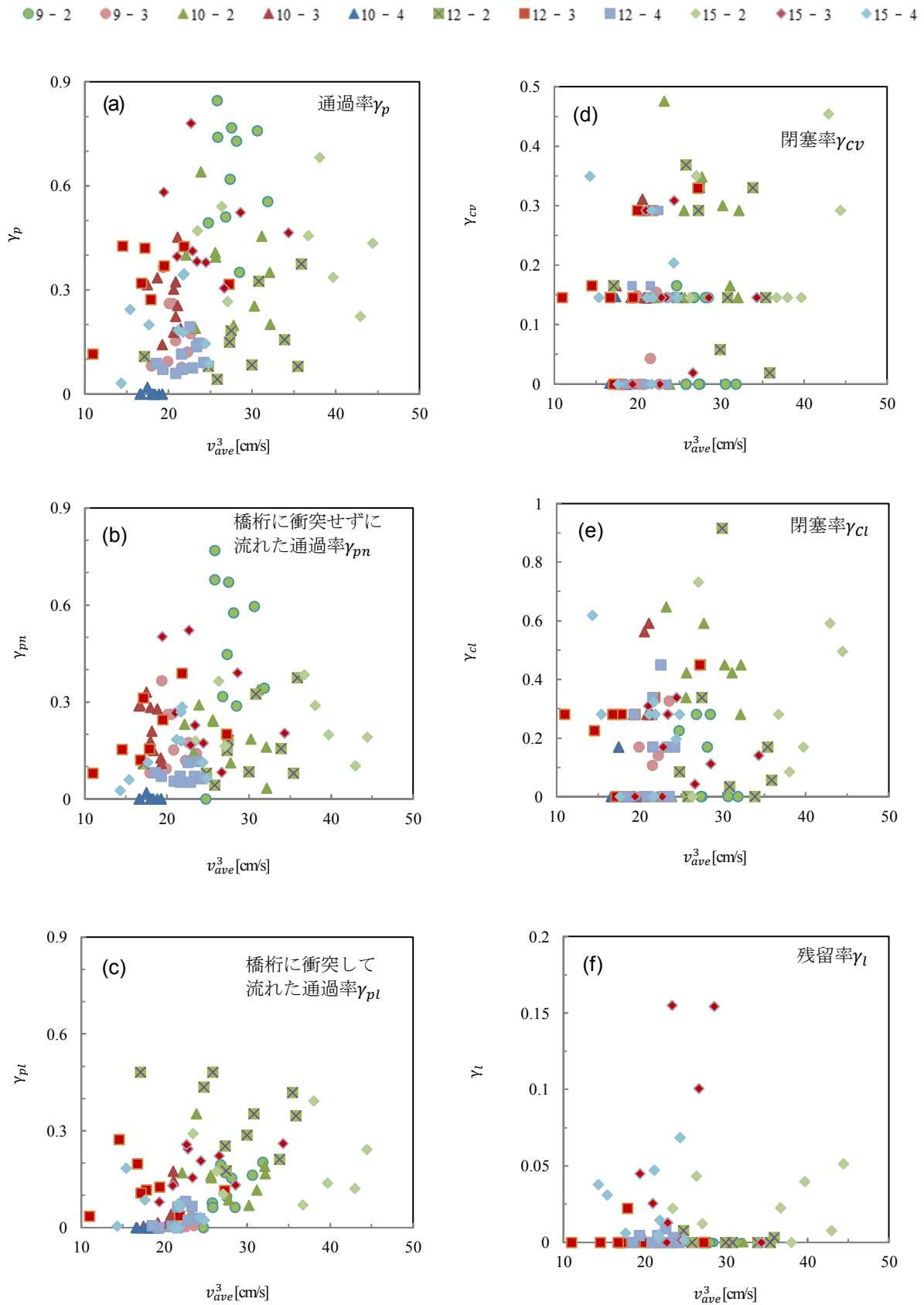


図-11 流速3秒間の時間平均 v_{ave}^3 と漂流物の通過率、閉塞率及び残留率の関係

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(d)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, $36.05\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 130.48\text{cm/s}$ の領域で γ_{cv} は0.476までとなる。 γ_{cv} の値は $\gamma_{cv}=0, 0.146, 0.292$ 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。 $\gamma_{cv}=0.146$ 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。 $\gamma_{cv}=0.292$ 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} が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 γ_{cv} は0.146以上となる。

次に, 図-8(e)において, 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 γ_{cl} は0.915までとなる。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。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} が大きいばらつきを示すこととなる。

図-8(f)において, 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 γ_l は0.188までとなる。貯水部水位が $h_1=9\text{cm}$ 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。貯水部水位が高くなり, 流量が大きくなると, $h_1=12\text{cm}$ 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。この場合には, $48.95\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 93.40\text{cm/s}$ の領域で, v_{max} が大きくなるに従って, γ_l も増加になる。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 $\gamma_l=0.188$ の最大値を示す。なお, v_{max} が更に大きくなると, 実験ケース15-2では, 前述した v_{max} と通過率及び閉塞率の関係のように, 橋桁前面及び桁下空間に閉塞したりすることにより, 漂流物が桁下空間や橋面上に通過したり, γ_l が逆に小さくなる。

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。橋面上に漂流物の残留率 γ_l に対する, 重量及び体積の観点から小さい漂流物の残留が γ_l に支配的な影響を及ぼす。

以上より, v_{max} と閉塞率の関係について, 重量及び体積の観点から大きい漂流物の桁下への閉塞は閉塞率に支配的である。 v_{max} と残留率 γ_l の関係について, 逆に, 小さい漂流物の残留が橋面上に残留に支配的である。 $48.95\text{cm/s} \leq v_{max} \leq 93.40\text{cm/s}$ の低い領域で, v_{max} が大きくなるに従って, γ_l が0.188まで増加になり, v_{max} が更に大きくなると, γ_l が逆に小さくなる。

(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

図-12(a)において, 前面波高 a_f [cm]と 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 γ_p は0.846まで大きくなる。桁下高が一番低い $h_c=1\text{cm}$ ($e=0.0117$)の場合(10-4, 12-4, 15-4)には, v_{max} の場合と同様に, $3.44\text{cm} \leq a_f \leq 6.16\text{cm}$ の領域で γ_p は0.347まで高くなる。桁下高 $h_c=2\text{cm}$ ($e=0.0156$)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 a_f が大きくなると, γ_p が $0.078 \leq \gamma_p \leq 0.780$ 漸増する。桁下高が最大となる $h_c=3\text{cm}$ ($e=0.0235$)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 $0.190 \leq \gamma_p \leq 0.846$ となり, 明確な関連性は見られない。

図-12(b), (c)において, v_{max} の場合と同様に, 桁下高が低い場合には, a_f が高くなるに従って橋桁に衝突せずに流れる漂流物の通過率 γ_{pn} と橋桁に衝突して流れる漂流物の通過率 γ_{pl} の両方が高くなる傾向を示す。桁下高が高い場合には, γ_{pn} が大きいばらつきを示すが, a_f が高くなるに従って, γ_{pl} も増加し続ける。

背面波高 a_r [cm]と通過率 γ_p , γ_{pn} 及び γ_{pl} の関係に着目すると, 図-13(a)~(c)において, 桁下高が低い場合には, 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し, 桁下高が高い場合には, 明確な関連性は見られなかった。また, v_{max} 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る漂流物の通過率 γ_{pn} 並びに橋桁に衝突して流れる漂流物の通過率 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せない。

図-14(a)~(c)において, $85.97\text{cm/s} \leq c \leq 123.81\text{cm/s}$ の領域で γ_p は0.846まで大きくなり, v_{max} との関係と同様の傾向を示す。 γ_{pn} 並びに γ_{pl} の内訳については, まず, γ_{pn} との関係に着目すると, 上記の波速 c の領域で γ_{pn} は0.769まで大きくなる。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 $88.67\text{cm/s} \leq c \leq 92.72\text{cm/s}$

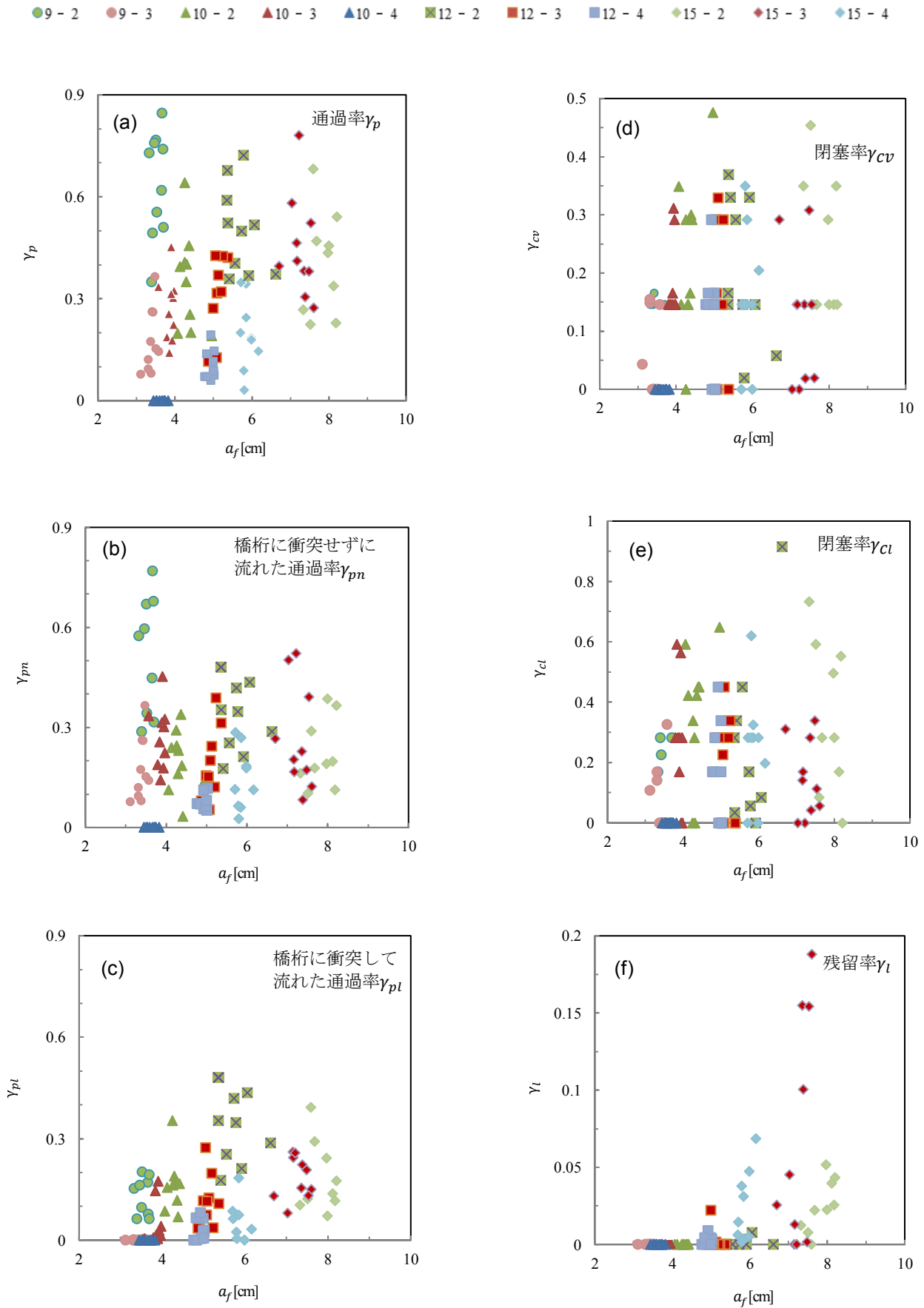


図-12 前面波高 a_f と漂流物の通過率, 閉塞率及び残留率の関係

● 9-2 ● 9-3 ▲ 10-2 ▲ 10-3 ▲ 10-4 ■ 12-2 ■ 12-3 ■ 12-4 ◆ 15-2 ◆ 15-3 ◆ 15-4

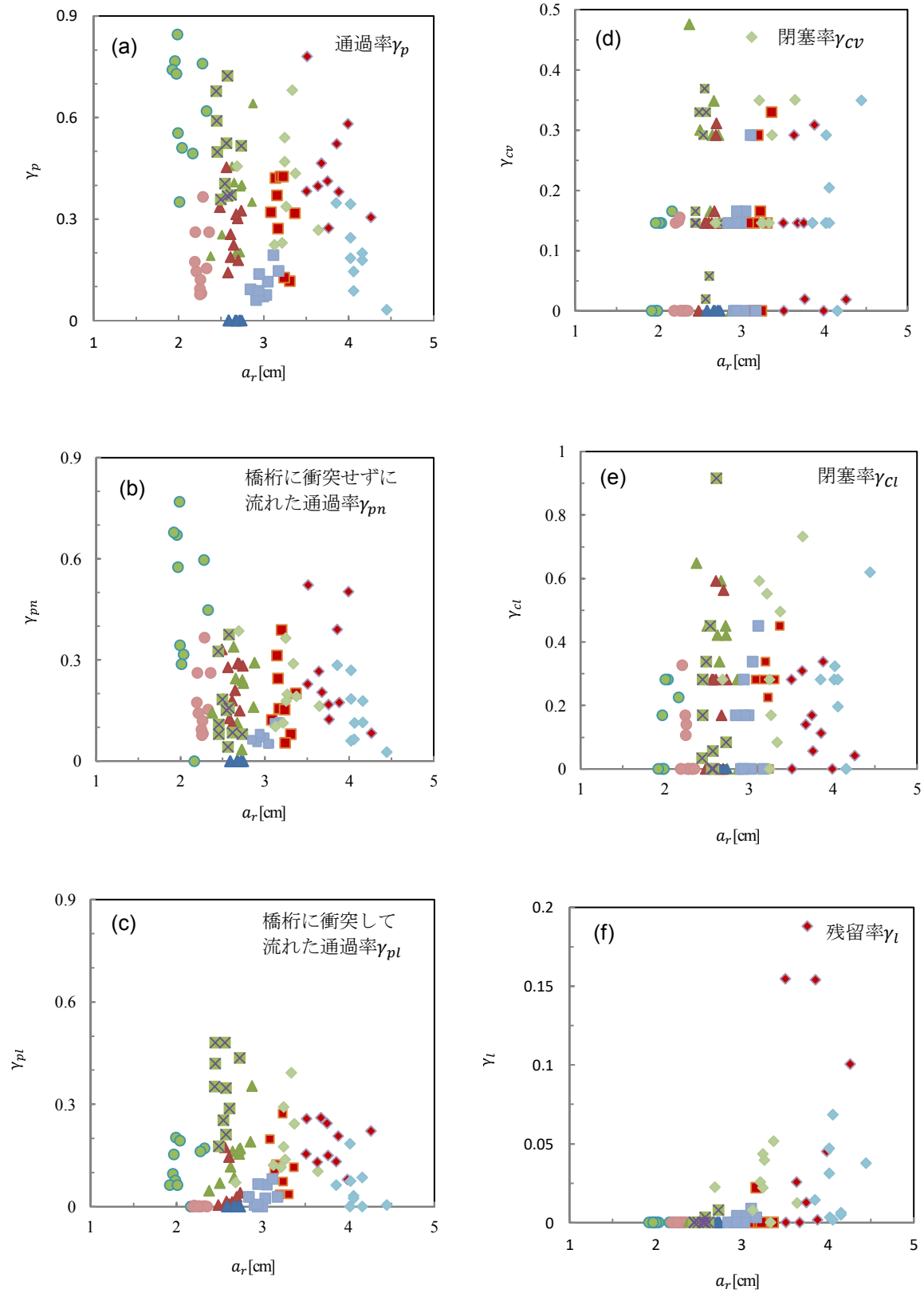


図-13 背面波高 a_r と漂流物の通過率, 閉塞率及び残留率の関係

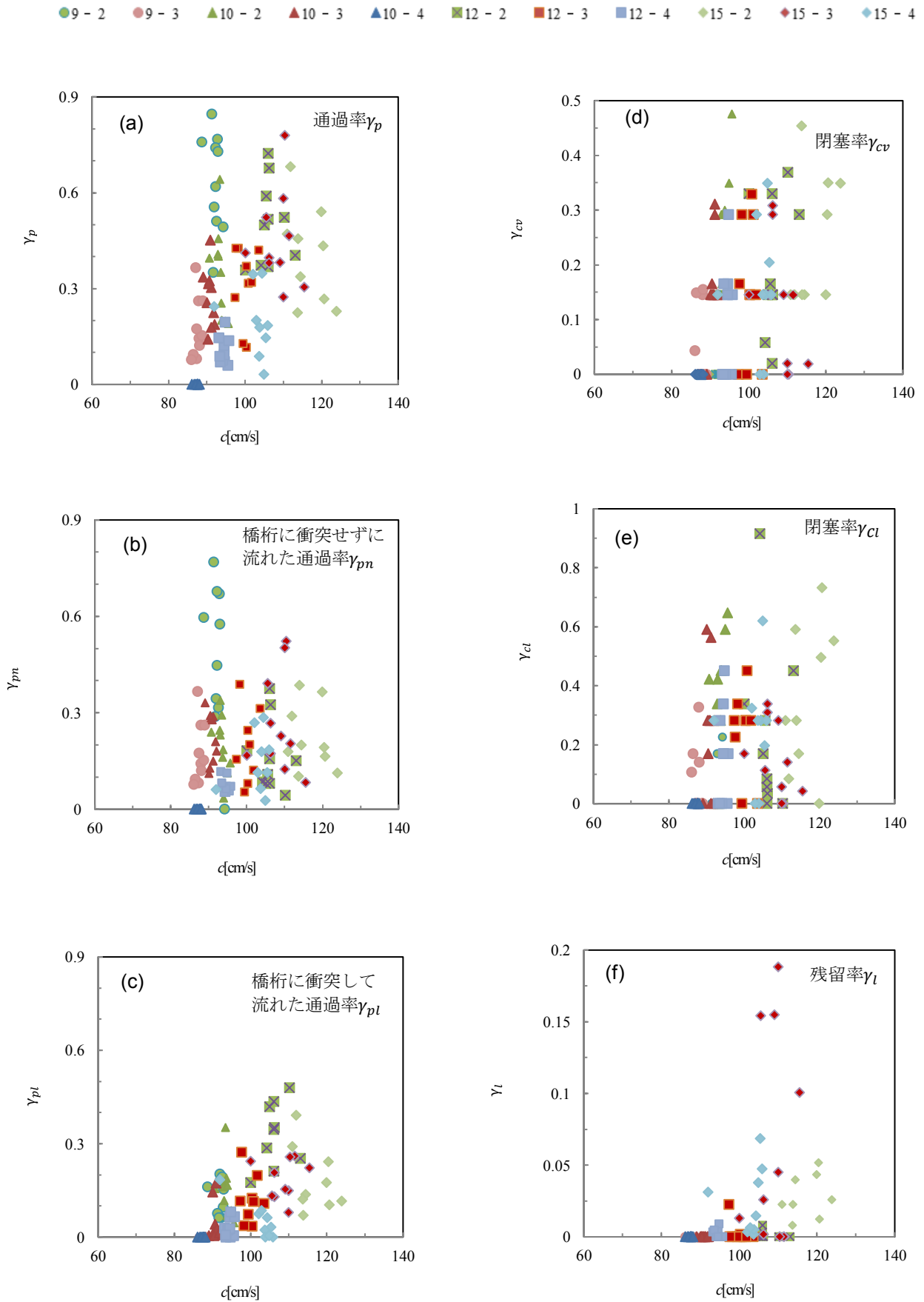


図-14 波速 c と漂流物の通過率, 閉塞率及び残留率の関係

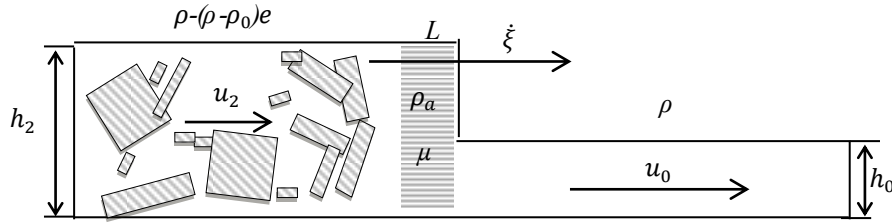


図-15 漂流物を伴う波の先端部のモデル

の領域で $0.448 \leq \gamma_{pn} \leq 0.769$ となる. この以外の波速 c の領域では大きなばらつきを示す. 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 γ_{pl} は 0.481 まで大きくなる. 波速 c が低い領域の 103.50cm/s 以下では, c が速くなるに従って γ_{pl} は 0.353 まで全体的に高く, 103.50cm/s 以上の c が高い領域では, γ_{pl} は 0.481 までの数値を取る, 明確な関連性は見られなかった.

図-12(d), (e)から図-14(d), (e)において, 津波波高及び波速と漂流物の閉塞率 γ_{cv} 及び γ_{cl} の関係について, v_{\max} との関係と同様な傾向を示す.

図-12(f), 図-13(f)及び図-14(f)において, a_f と a_r 及び波速 c と残留率 γ_l の関係に着目すると, 貯水部水位が低い場合には, v_{\max} との関係と同様な傾向を示す. また, 貯水部水位が $h_1=15\text{cm}$ の場合には, 前面波高 a_f 及び波速 c と残留率 γ_l の関係において, v_{\max} と同様な傾向を示す. しかし, 背面波高 a_r と γ_l の関係について, 明確な関連性は見られなかった.

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 に示すようになる.

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.

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

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.

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

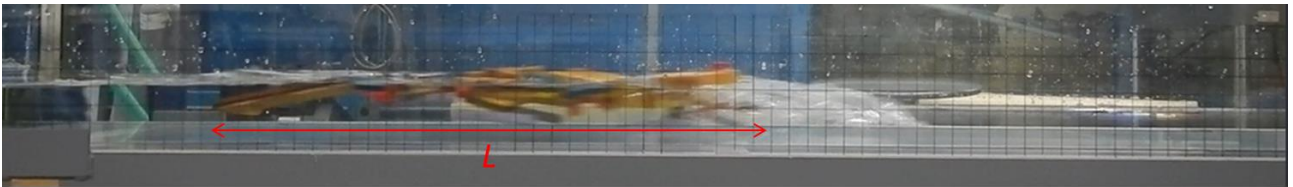
ここでは, 松富ら⁸⁾による合成摩擦力の計算方法を参考に, $\rho_a (= \rho - \rho_0)$ は波の先端部における漂流物層の密度, g は重力加速度, L は漂流物層の長さである. 本モデルにおける運動量保存則は次式となる. なお, 次式において, $\rho = \rho_0 = \rho_a$ かつ $L = 0$ とすれば, 理想段波理論の運動量保存則となる.

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

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.

$$u_2 = u_0 + \left[\frac{\frac{1}{2}\{\rho - (\rho - \rho_0)e\}gh_2^2 - \frac{1}{2}\rho gh_0^2 - \mu \rho_a g L h_2}{\rho h_0(\xi - u_0)} \right] \quad (12)$$

$$\xi = u_0 + \sqrt{\frac{\{\rho - (\rho - \rho_0)e\}h_2 g \left[\frac{1}{2}\{\rho - (\rho - \rho_0)e\}h_2^2 - \frac{1}{2}\rho h_0^2 - \mu \rho_a L h_2 \right]}{\rho h_0 \{\rho - (\rho - \rho_0)e\}h_2 - \rho h_0}} \quad (13)$$



(a)ゲート開放から 2.4s($L=63\text{cm}$)



(b)ゲート開放から 2.6s($L=62\text{cm}$)



(c)ゲート開放から 2.7s($L=64\text{cm}$)



(d)ゲート開放から 2.9s($L=65\text{cm}$)

写真-2 実験ケース 15-2 の第 5 回, 水路の側面から撮影

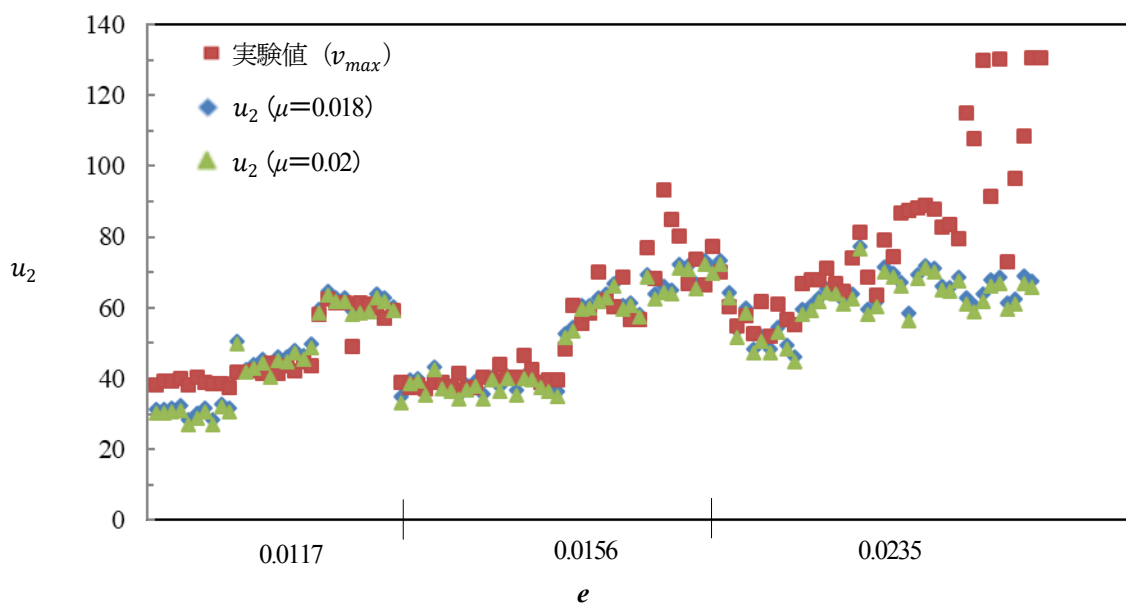


図-16 実験値と理論値の比較例

以上より、まず、式(13)において、摩擦係数 μ をそれぞれ 0.02 及び 0.018 と仮定した上で、式(3)から算出された占有率 e を適用し、 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 、 ρ_0 を表-1 に示す漂流物の平均密度として定める。次に、漂流物域層の長さ L と波の先端部の水深 h_2 を水理実験から後述するように測定し、それらを式(13)に代入した上で、波の伝播速度 ξ を算出する。これより、式(12)に代入することより、上流域の流速 u_2 の理論値が得られる。

写真-2 は、漂流物が群としてゲートから流下方向に流れる状態を側面より撮影したものである。静水部において漂流物群が橋桁に衝突する前のおよそ 0.5 秒間において、漂流物群の長さ L が安定な状態となる。その時間間隔における L の代表値と水深をそれぞれ漂流物域層の長さ L と水深 h_2 として定義する。

以上、求められる上流域の流速 u_2 の理論値と実験値 v_{\max} の比較を図-16 に示す。 $36.04\text{cm/s} \leq v_{\max} \leq 76.81\text{cm/s}$ の流速が低い領域では、 $\mu=0.02$ の場合における理論値は実験値を良好に再現している。これより、流速が低い領域では、本モデルで適切な摩擦係数 μ を選択すれば、津波漂流物の作用を考慮した上流域の流速 u_2 を算出できる。しかし、流速がさらに大きくなり、 v_{\max} が 76.81cm/s 以上の高い領域では理論値に対して、10 回の実験値がばらつくとともに、理論値は実験値より過小に評価されている。特に、桁下高 $h_c=3\text{cm}(e=0.0235)$ において、実験ケース 12-2、15-2 には、実験値と比べると理論値は 1/2 程度小さくなり、本モデルを適用できないと考えられる。

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。最後に、Stoker のモデルに基づき、橋桁への津波漂流物の作用を考慮した上流域の流速 u_2 のモデルを提案した。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、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

h_c 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 h_c 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) 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 γ_{cv} は0.15から0.3程度の大きな値に収束した。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。
- (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 h_c 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) 津波漂流物の作用を考慮した波の先端部のモデル化については、Stokerのモデルに基づき、上流域の流速 u_2 の算定式(式(12)と式(13))を得た。 $36.04\text{cm/s} \leq v_{\max} \leq 76.81\text{cm/s}$ の流速が低い領域では、本モデルによる説明性が明らかに高い。しかし、それ以上の流速が高い領域では、本モデルの説明性の限界があり、この原因については、今後の検討している予定がある。

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士生である原昌弘氏、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 巻, 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 巻, pp. 1366-1370, 2005.
- (2018.11.13 受付, 2019.1.28 修正, 2019.2.17 受理)

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.