波が鉛直壁に衝突した際に生じる 飛沫の発生初期における飛散特性

武田 将英¹・川瀬 恭平²・重松 孝昌³
津田 宗男⁴・羽渕 貴士⁵・網野 貴彦⁶

¹正会員 東亜建設工業(株) 土木事業本部設計部
(〒163-1031 東京都新宿区西新宿 3-7-1 新宿パークタワー31F)
E-mail: m_takeda@toa-const.co.jp

²修(工) TIS(株) IT基盤サービス本部データセンター統括部
(〒160-0023 東京都新宿区西新宿 8-17-1 住友不動産新宿グランドタワー14F)
E-mail: kawase.kyohei@tis.co.jp

³正会員 博(工) 大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻
(〒558-8585 大阪市住吉区杉本 2-2-138)
E-mail: shige@urban.eng.osaka-cu.ac.jp

⁴正会員 博(工) 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町 1-3)
E-mail: m_tsuda@toa-const.co.jp

⁵正会員 博(工) 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町 1-3)
E-mail: t_habuchi@toa-const.co.jp

⁶正会員 博(工) 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町 1-3)
E-mail: t_amino@toa-const.co.jp

栈橋に代表されるような著しい劣化が指摘されている港湾構造物の効率的な維持・管理手法を構築するためには、港湾構造物に波浪が作用する際に発生する飛沫の特性を定量的に把握する必要がある。本研究では、斜面上に設置された鉛直壁に波が作用する際の飛沫の発生過程を高速度カメラを用いて撮影し、新たに開発した画像解析アルゴリズムにより個々の飛沫の運動特性を解析して、その定量的な把握を試みた。飛沫径、発生飛沫個数、飛沫体積、飛散速度、飛散角度などの諸量の定量的な計測が可能であることを示した。

Key Words : sea spray, PIV, PTV, vertical wall, scatter

1. はじめに

港湾構造物の中でも栈橋上部工は、塩害による早期劣化が維持管理上の大きな問題になっている。効率的に塩害を抑制するためには、コンクリート構造物の表面に供給される塩類の総量を正確に把握する必要がある。しかし、栈橋下面のコンクリート表面に付着する飛沫の発生源や付着過程について論じた既往研究はほとんどない。

従来の、海生塩化物イオン量の発生に関する研究は、外洋で風によって生成される局所砕波(white cap)を対象としたものが多い(例えば、宇多ほか¹⁾、細山田ほか²⁾など)。局所砕波によって生成される飛沫は粒径が数 μm と非常に小さく、風によって海岸線から数十 km 離れた内陸域まで運ばれ、広範囲に塩害をもたらすことが指摘されている。最近では、海岸に近い砕波帯で発生する飛沫に関する研究も取り組みが始まっている(例えば、

de Leeuw³⁾、Watanabe *et al.*⁴⁾)。砕波帯で発生する飛沫は、外洋で発生するものと比較して粒径が大きく、また、発生濃度も高いことが報告されている。

最も海岸線に近い位置にある栈橋や護岸などの海岸構造物では、構造物そのものに波が衝突して一層大きな飛沫が生成され、飛沫生成時の運動量を保持したまま近接する構造物表面に直接付着するが、このような海岸構造物を対象にした海水飛沫の発生に関する研究はほとんどない。網野ほか⁵⁾によれば、栈橋を構成する梁や床版などの部材やその平面的な位置によって塩害による劣化度が異なることが報告されている。もし、構造物の表面に付着する海水飛沫量を3次元的な分布として適切に予測することができれば、現状よりも効率的な維持管理が可能になると考えられる。構造物に波が作用する際の波圧に関する研究は、Cokker & Peregrine⁶⁾をはじめとして精力的に進められてきているが、これに伴う飛沫の発生メ

カニズムや飛沫の特性については未解明な点が多く残されている。

そこで、本研究では、波が鉛直壁に衝突する際に発生する飛沫を高速ビデオカメラで撮影し、画像解析により飛沫の発生過程およびその飛散運動について基礎的なデータを得ることを目的とした。

2. 実験概要と解析アルゴリズム

(1) 実験概要

実験は、図-1に示す長さ50m、幅1.0m、高さ1.5mの片面ガラス張りの二次元造波水路を用いて行った。水槽内には、造波機より12.7mの位置から1/30の斜面が設置されており、造波機前面の水深が $h_0=0.71\text{m}$ と一定となるように水道水を注水した。高さ $h_w=0.28\text{m}$ の不透過鉛直壁を斜面上の水深 $h_m=0.06\text{m}$ の位置に設置した。水平床および斜面上に容量式波高計を設置してサンプリング周波数50Hzで水位変動を計測し、それぞれの地点における通過波高を求めた。作用波は、周期 T の規則波である。造波直後には、図-2に示すように造波機で発生させた波は徐々に発達しながら伝播してゆく。その結果、鉛直不透過壁に到達して飛沫が発生した波の水平床上における波高は、所期の目標波高 H_0 とは限らない。そこで、不透過壁に波が到達してから飛沫が発生し始めるまでの波数を数え、その波に相当する水平床上の波高 H_0 を求めた。表-1は、このようにして求めた H_0 で実験条件を整理している。

波が鉛直壁に衝突する際に発生する飛沫の発生・飛散過程は、図-3に示すように、3台の高速度カメラを用いて撮影した。撮影にあたっては、水路上方から2台のメタルハライド光源を照射するとともに、撮影用の黒色仕切板を水路に平行に設置して飛沫が明瞭に撮影されるように工夫した。撮影諸元は、露光時間 10^{-3}s 、撮影間隔1000fps、画像サイズは512pixel×1280pixel、計測解像度5

図-1 実験水槽の概要

図-2 水平床上における水位の一例

図-3 画像計測装置

表-1 実験条件および実験結果

Case	$h_0(\text{m})$	$T(\text{s})$	$H_0(\text{m})$	$L_0(\text{m})$	h_0/L_0	H_0/h_0	H_0/L_0	U_r	$N_0(\text{個})$	$V_0(\times 10^{-6}\text{m}^3)$
1	0.71	1.60	0.038	3.44	h/L	0.054	0.011	1.256	176	9.0
2			0.040	3.44	0.21	0.056	0.012	1.323	427	18.8
3			0.043	3.44	0.21	0.061	0.013	1.422	335	19.6
4			0.056	3.44	0.21	0.079	0.016	1.852	811	34.7
5		1.75	0.040	3.90	0.18	0.056	0.010	1.700	317	12.8
6			0.042	3.90	0.18	0.059	0.011	1.785	630	22.5
7			0.044	4.35	0.18	0.062	0.011	1.870	689	26.0
8			0.046	4.35	0.16	0.065	0.011	2.432	395	9.0
9		1.90	0.047	4.35	0.16	0.066	0.011	2.485	1222	33.5
10			0.060	4.35	0.16	0.085	0.014	3.172	852	20.9
11			0.036	4.79	0.15	0.051	0.008	2.308	113	6.1
12		2.05	0.038	4.79	0.15	0.054	0.008	2.436	1131	42.9
13			0.042	4.79	0.15	0.059	0.009	2.692	1402	52.0
14			0.045	4.79	0.15	0.063	0.009	2.885	1233	36.2

$\times 10^4 \text{ m/pixel}$ であった。

(2) 画像解析アルゴリズム

ここでは、3台のカメラのうち、鉛直壁に衝突した波が上方へと打ち上がるとともに飛沫が発生し飛散する様子を撮影した領域②の画像を用いて画像解析を行った。

まず、飛沫存在情報を表す輝度値に対して PIV (粒子イメージ流速計測法, Particle Image Velocimetry) を適用して空間の速度分布を得た。ただし、飛沫は存在密度が小さいうえに偏在しているため、十分な速度情報を得ることができなかった。そこで、小林ほか⁷⁾の方法を用いて流速情報を補間した。このようにして PIV によって求めた流速を予測値として PTV (粒子画像追跡流速計測法, Particle Tracking Velocimetry) を適用し、個々の飛沫の径 D 、飛散速度 V 、飛散角度 θ を求めた。なお、飛沫径 D はそれぞれの飛沫を構成する画素数から求められる面積の等価径とし、飛散角度 θ は鉛直壁面と飛散方向の成す角度として求めた。図-4 は、画像解析結果の一例を示したもので、図中の黒い部分が流体を表しており、左が PIV を行った結果を、右が PTV を行った結果を示している。ただし、撮影画像を白黒反転表示している。

飛沫が離散的に撮影されている領域においては、連続撮影画像間での飛沫の対応付けは良好である。しかし、数多くの飛沫が発生すると、飛沫が重なったり隣接して撮影される機会が多くなり、あたかもひとつの飛沫のように撮影される。その結果、異なる画像間での対応精度が悪くなり、対応付かなかった飛沫情報を切り捨てることになるので、飛沫発生量を過小に評価する⁸⁾ことになる。そこで、本研究では、連続する2画像間で PTV を適用して対応付かなかった飛沫を抽出し、この飛沫を含む局所領域に対して、二値化の閾値を段階的に変化させて飛沫を分離するアルゴリズムを付加したうえで PTV 解析を再度行って連続する画像間で飛沫の対応付けを行い、対応付いた飛沫画素面積の総和が最も大きくなるような結果を用いて、飛沫情報を汲み取ることとした。このアルゴリズムを付加することによって飛沫の分離精度が向上した。本アルゴリズムのフローを図-5 に示す。

さらに、撮影画像の上端から 50pixel、および左端 (沖側端) から 52pixel の位置に検査測線を設定し、これらの測線を通過する飛沫を計数することによって、画像外へ飛散する飛沫総数を求めた。画像外へ飛散した飛沫個数と画像中の飛沫数と合算することによって、発生飛沫総数 N_0 を求めることが可能となった。

3. 実験結果

(1) 飛沫の発生数

本実験条件の下では、鉛直壁に波が作用し始めてから

$t^* = t/T = 0.09 \sim 0.12$ までにほとんどの飛沫が発生していた。計測された飛沫径 D は $0.5 \sim 10 \times 10^{-3} \text{ m}$ の大きさを有しており、表-1 に示すように発生総数 N_0 は約 100~1500 個程度であった。得られた飛沫径 D を用いて総飛沫体積 V_0 を求めた結果も同表に示しているが、それによれば、1波あたりの総飛沫体積 V_0 は約 $6 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ である。

図-4 画像解析結果の一例 (左: PIV, 右: PTV)

図-5 画像解析アルゴリズムのフロー

図-6 飛沫径の分布 ($T=2.05s$, $H_{db}=0.045m$)

図-7 飛沫径の度数分布と飛沫量

図-6 には、飛沫径の分布の一例を示す。同図は、 $T=2.05s$, $H_{db}=0.045m$ の場合のものであるが、径が小さい飛沫発生数が多く、径が大きくなるほど飛沫発生数は指数関数的に減少する傾向を示すことがわかる。なお、同図において、 $D-0.005m \leq D < D+0.005m$ の飛沫径を有する粒子数を $N(D)$ としている。

図-7 は、粒径ごとの飛沫発生個数 $N(D)$ が、発生総数 N_0 に占める割合を示したものである。いずれの条件においても、 $N(D)/N_0$ は粒径 D の増加とともに単調減少傾向を示していることがわかる。同図を詳細に眺めると、発生総数 N_0 が多い場合ほど、粒径の小さな飛沫の個数が増える傾向が見られることがわかる。一方、同図には、径ごとの飛沫体積の総和 $\Sigma V(D)$ が総飛沫体積 V_0 に対する割合も示しているが、これによれば、 N_0 の増加とともに中位径 ($2 \sim 6 \times 10^3 m$) の飛沫量が総飛沫量に占める割合が大きくなり、同時に、大粒径 ($7 \times 10^3 m$ 以上) 飛沫量が総飛沫量に占める割合が小さくなる傾向を見て取ることができる。このことは、飛沫発生総数と径ごとの飛沫体積には密接な関係があり、飛沫径の分布特性を正確に把握することの重要性を示唆するものと考えられる。

(a) $D=1 \times 10^3 m$ の発生個数

(b) 総発生個数

図-8 アーセル数と飛沫の発生個数

実験における飛沫の発生状況の観察によれば、鉛直壁前面における波の非線形性が強くなると飛沫が発生するように思われた。鉛直壁面に作用する流体運動諸元によって非線形性を計る必要があるが、現段階では十分なデータを持ち合わせていない。そこで、本研究では、水平床上における波の諸量を用いてアーセル数 U_r を式(1)で求め、これと飛沫の発生個数との関係について検討した。

$$U_r = \frac{H_0 L_0^2}{h_0^3} \quad (1)$$

図-8(a)は、飛沫径 $D = 1 \times 10^3 m$ の場合のアーセル数と発生個数との関係を示したものである。同図(b)は、飛沫の総発生数とアーセル数との関係を示したものである。ばらつきが大きいものの、いずれの場合もアーセル数の増加とともに、発生数が線形的に増加する傾向にある。図-7 に示したように、飛沫径 D が増加するとともに発生個数 $N(D)$ は減少するので、アーセル数と発生飛沫個数との関係は、飛沫径が小さい場合の両者の関係が支配的になると考えられる。

(2) 飛沫特性の時間変化

本研究における実験条件の下では、斜面上で碎波して鉛直壁に波が作用することはなく、鉛直壁に波が作用した後に壁面に沿って上方へと流体が運動しながら飛沫が発生し、飛散するような状況が観察された。図-9は、波が直立壁に作用して飛沫が発生し始めた時刻を0として、飛沫の発生個数の経時変化を示したものである。図中の赤線は、前述した個々の撮影画像中の検査測線から外側を除く領域に存在する飛沫の個数を示したものである。一方、青線および緑線は、それぞれ、測線を通して画像の上方および沖側側方に出て行った飛沫個数を表している。さらに、黒線は、これらの総和を表している。当然のことではあるが、波が鉛直壁に作用して飛沫が発生し始めた直後（図中の t^* がおおよそ0.03以下）の場合には、画像中に存在する飛沫個数と飛沫発生総数は一致している。しかし、発生・飛散した飛沫は、時間の経過とともに撮影領域外へと出て行き、上方（赤線）あるいは沖側（緑線）に飛散していく飛沫が有意な量を示すようになる。図-8は、 $T=1.90s$, $H_0=0.060m$ の場合の結果を示しているが、この条件下では、 $t^*=0.05\sim 0.10$ までの短時間で、全飛沫が発生し終えていると判断することができ、また、この場合の総飛沫発生数はおおよそ600個程度であることがわかる。

図-10は、発生した飛沫の飛散速度の経時変化を示したものであり、実線は平均飛散速度 U_{bar} を、点線は最大飛散速度 U_{max} を表している。まず、最大飛散速度 U_{max} は、飛沫の発生初期に9~12m/s程度の大きな値を示し、その後、徐々に低下することがわかる。一方、平均飛散速度 U_{bar} も初期にピークを取り、その後、漸減する傾向を示す。 U_{max} は U_{bar} との2~3倍程度の値を持つことがわかる。

図-11は、鉛直壁面と飛沫の飛散方向ベクトルとの成す角度の経時変化を示したものである。飛沫の発生し始めた直後には、35~40度程度の平均飛散角度となっているが、これは、鉛直壁面に波が作用した直後には沖側方向にも飛散する飛沫が比較的多いことを意味している。その後の平均飛散速度は20~30度程度のほぼ一定の大きさを有しており、鉛直壁面上を流体が運動しながら飛沫が発生するような状況になれば、飛沫の飛散方向は概ねこの角度に安定することを意味していると考えられる。

なお、図-10および図-11は、撮影画像中に存在する飛沫だけを計算の対象としており、撮影画像外に出てしまった飛沫については計算に含めていない。ただし、重力加速度のみが作用すると仮定して、画像外に出てしまった飛沫の飛散速度および飛散角度を検討したところ、 $t^*<0.15$ の短時間における飛散速度および飛散角度の変化は非常に小さく、重力加速度がこれらに及ぼす影響は極めて小さいとの結論に至っている。

図-9 飛沫発生数の経時変化

図-10 飛散速度の経時変化

図-11 飛散角度の経時変化

4. おわりに

本研究では、高速度カメラを用いて、鉛直壁に波が作用する際の飛沫の発生・飛散過程を撮影し、画像解析によって、発生飛沫の特性を定量的に把握することを試みた。撮影画像から個々の飛沫を抽出し、より高精度な飛沫の対応付けを行うアルゴリズムを開発するとともに、飛散して撮影領域外へと飛び出してしまった飛沫情報を

も記憶することによって、発生したすべての飛沫に対する諸量の把握を行った点に新規性を有する。

本研究で開発したアルゴリズムを用いて得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- ・本実験条件の下で得られた飛沫径は、 $0.5 \sim 10 \times 10^3$ m 程度であり、総飛沫発生数は 100～1500 個のオーダーである。画像より求められる等価径を用いて発生飛沫体積を求めると、 $6 \sim 50 \times 10^6 \text{ m}^3$ となった。
- ・飛沫径の小さい飛沫ほど発生個数は大きく、飛沫径の増加とともにその発生個数はほぼ指数関数的に減少する。
- ・ばらつきは大きいものの、アーセル数と飛沫発生個数との間には線形があると推察される。
- ・飛沫の最大飛散速度および平均飛散速度のいずれも、そのピークは飛沫の発生初期段階に現れ、その後は、徐々に小さくなる。飛沫の最大飛散速度は、9～12m/s 程度である。
- ・飛沫の飛散角度は、飛沫の発生直後に 30～40 度程度のやや大きな値を示すが、その後は、20～30 度程度の緩やかに増加はするもののほぼ一定値を示す。

以上のように、本研究で示した解析アルゴリズムを利用することによって、飛沫の発生時期や発生総数などの飛沫発生過程の諸量を定量的にもとめることができるようになった。今後は、得られた知見を基にして、飛沫の

発生モデルの構築に努めたい。

参考文献

- 1) 宇多高明, 小俣篤, 小西正純: 海岸からの飛来塩分量の計算モデル, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 1051-1055, 1992.
- 2) 細山田得三, 山田文則, 田安正茂: 波動場数値計算の碎波判定によって発生する飛来塩分とその輸送に関する数値実験, 海岸工学論文集, No. 49, pp. 1256-1260, 2002.
- 3) De Leeuw, G.: Sea spray aerosol production from waves breaking in the surf zone, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 30, Suppl. 1, pp. S63-S64, 1999.
- 4) Yasunori WATANABE, Hiroshi SAEKI and Roger J. HOSKING: Three-dimensional vortex structures under breaking waves, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 545, pp. 291-328, 2005.
- 5) 網野貴彦, 大即信明, 齊藤豪, 羽瀨貴士: 構造形式や波の作用の影響を考慮した栈橋上部工部材の表面塩化物イオン濃度の推定方法に関する提案, コンクリート工学論文集, Vol. 21, No. 1, pp. 1-11, 2010.
- 6) Cooker, M.J. & Peregrine, D.H.: A model for breaking wave impact pressures, *Proceedings of 22nd Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1473-1486, 1990.
- 7) 小林敏雄, 佐々木伸夫, 石原智男, 佐賀徹雄, 上村康幸: 可視化技術と画像処理技術の円柱まわりの流れへの適用, 流れの可視化, Vol. 2, No. Supplement, pp. 41-46, 1982.
- 8) 武田将英, 魚住健治, 重松孝昌, 津田宗男, 羽瀨貴士, 網野貴彦: 鉛直壁に波が衝突した時の飛沫の発生条件に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, pp. 701-705, 2011.

CHARACTERISTICS OF SPLASH OF WATER SPRAY GENERATED BY WAVE IMPACT ON A VERTICAL WALL IN AN INCIPIENT STAGE

Masahide TAKEDA, Kyohei KAWASE, Takaaki SHIGEMATSU,
Muneo TSUDA, Takashi HABUCHI and Takahiko AMINO

For the establishment of the management method of port and harbor facilities which are severely deteriorated by chloride damage, quantitative knowledge of spray when wave impacts on the facilities such as a vertical wall and landing pier. In this study, the process of generation and scatter of spray was taken in pictures by using high speed cameras. The characteristics of spray such as diameter of each spray, number of generated spray, splash velocity, splash direction and so on were analyzed by a developed new algorithm of analyzing captured images.