

消波護岸によるしぶきの発生と護岸背後地への輸送

松永信博*・櫛田 操**・入江 功***

1. 緒 言

海岸堤防・護岸、離岸堤および防波堤等の海岸港湾構造物には、波の圧力、反射、越波等のエネルギーを吸収する目的で、異形消波ブロックが広く用いられている。消波ブロックの波エネルギー減殺効果は、多数の研究と施工実績により十分に立証されている。しかし、その一方では、構造上、波しぶきを大量に発生するため、とくに強風作用下においては、陸域に広範囲にわたって塩害をもたらすことが考えられる。これまで、現地におけるしぶきの飛散や塩害に関する観測や調査がある(仲座他, 1990; 村上他, 1992; 宇多他, 1992)。しかし、波の特性および風速としぶきの飛散分布との関係を、実験と理論により系統的に調べた研究は極めて少ない(高田, 1972; 石田他, 1982; 仲座他, 1993)。

本研究は、大分県別府港の消波護岸から発生するしぶきが、強風作用下において、陸上にどのように輸送されるかを二次元模型実験により調べ、さらに理論的考察を加えたものである。

2. 実験装置および実験方法

図-1は、模型実験で対象とした、大分県別府港に設置されている消波護岸の標準断面図を示す。設計波は、沖波周期 $T_0=5.5$ s, 沖波波高 $H_0=2.5$ mである。

実験には、長さ 32 m, 幅 0.6 m, 高さ 0.94 m の、水路上部に直径 0.73 m の半円ドームを取り付けた吸い込み式風洞を有する二次元造波水槽を用いた。図-2に実験装置と護岸模型の概要を示す。模型の現地に対する縮尺は 1/16 とした。現地に施工されている消波ブロックは、4 t 型テトラポッドの層積みであるが、実験では、4 t 型中空三角ブロックを 1/16 に縮尺した模型の乱積みとした。この護岸模型に対して、二次元規則波と風を同時に作用させることにより、消波護岸から発生するしぶき量を測定した。ここで便宜上、座標軸を護岸背後から風下方向に X 軸、鉛直上向きに Z 軸をとる。しぶき量の測定位置

は、原点から風下方向に、1 m 毎に 12 断面(しぶきの吹送距離は $X=0\sim 11$ m)とした。各測定位置で、脱脂綿を詰めた直径 3 cm, 深さ 5 cm の容器を鉛直方向に 5 cm 間隔で 10~12 個配列することにより、単位時間・単位面積当りに飛散するしぶき量 q ($g/cm^2 \cdot s$) の鉛直分布を求めた。しぶき濃度 C (g/cm^3) は、空気の単位体積当りに占めるしぶきの質量と定義し、 $C=q/U_m$ から算定した。ここで、 U_m は陸域での断面平均風速である。表-1は、実験条件およびしぶき濃度分布の代表量を示す。表中、 T :波の周期、 L_0 :沖波波長、 C_0 :沖波波速、 U_0 :水面上の断面平均風速、 h_c :静水面上の護岸天端高さである。 $h_c=18.1$ cm に固定した。表中の代表量 $C(0, 0)$ の値は図-9, また、 l の値は図-5 の説明において述べる。護岸底面の海底勾配は、 $i=1/30$ とし、護岸法先水深を 18 cm, 一様水深部の水深を 34 cm に固定した。実験波の条件は、現地に換算して、Run 1, 2, 3 は $T=5.5$ s, $H_0=2.3$ m, Run 4, 5 は $T=4.8$ s, $H_0=1.9$ m であり、設計波に比較してやや小さい波高となっている。

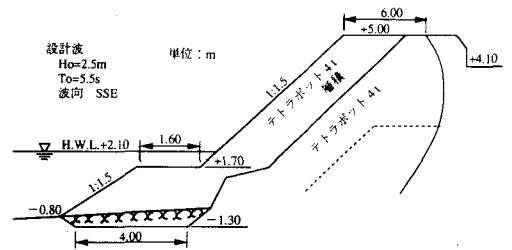


図-1 別府港消波護岸標準断面図

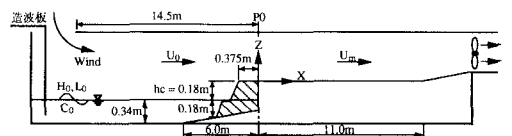


図-2 実験装置

* 正会員 工博 九州大学助教授 大学院総合理工学研究科
 ** 正会員 工修 日本文理大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

表-1 実験条件およびしぶき濃度の代表量

Run	実験条件									しぶき濃度の代表量		
	T (s)	H_0 (cm)	L_0 (cm)	C_0 (m/s)	U_0 (m/s)	H_0/L_0	U_0/C_0	h_c/H_0	$C(0,0)$ (g/cm ³)	l (cm)	l/h_c	
1	1.38	14.3	295	2.14	9.43	0.048	4.41	1.27	9.03E-5	7.52	0.42	
2	1.38	14.3	295	2.14	13.1	0.048	6.12	1.27	8.58E-4	5.48	0.30	
3	1.38	14.3	295	2.14	15.1	0.048	7.06	1.27	1.08E-3	5.28	0.29	
4	1.20	11.7	225	1.88	13.1	0.052	6.97	1.55	6.01E-4	6.69	0.37	
5	1.20	11.7	225	1.88	15.1	0.052	8.03	1.55	1.00E-3	5.96	0.33	

方向に指数関数的に減少することがわかる。また、 Z が十分大きい所や十分流下した所では、しぶき濃度は一定値に漸近する傾向がある。このことは、消波護岸近傍における濃度は、しぶきの沈降のため風下方向に急速に低下し、最終的には微細なエアロゾル状の粒子となって、断面にわたってほぼ一様濃度で流下

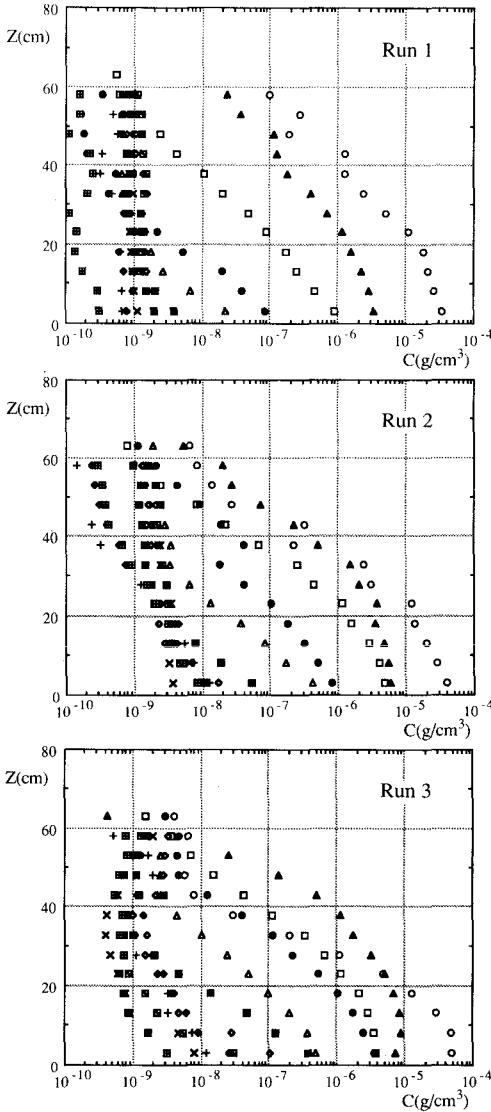


図-3 しぶき濃度の鉛直分布 (Run 1, 2, 3)

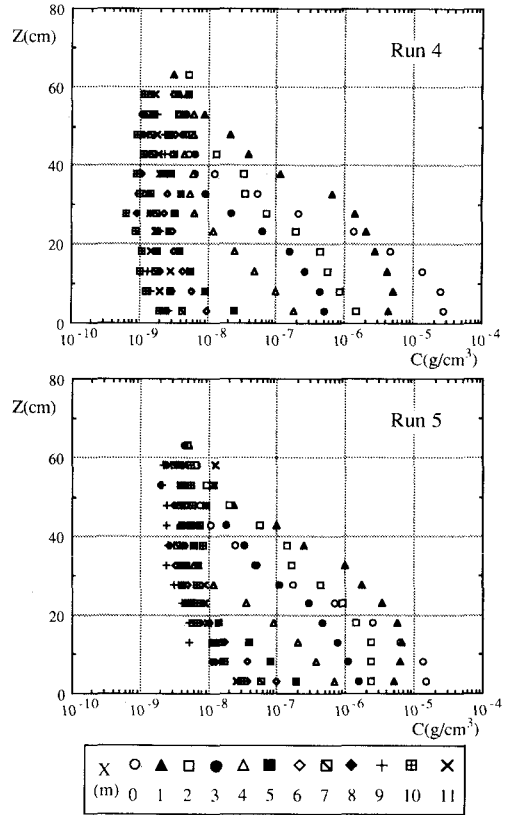


図-4 しぶき濃度の鉛直分布 (Run 4, 5)

3. 実験結果および考察

(1) しぶき濃度の鉛直分布

図-3 および図-4 は、しぶき濃度の鉛直分布を X をパラメータとして示す。全体として、しぶき濃度 C は鉛直

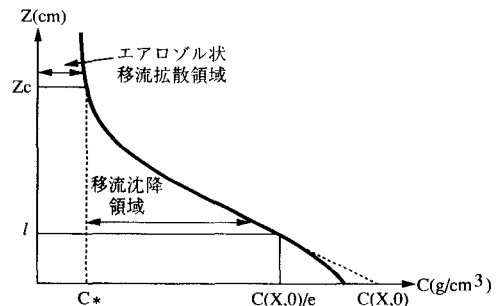


図-5 しぶき濃度の鉛直分布の領域区分模式図

することを示している。すなわち、消波護岸付近の領域では、宇多他 (1992) が指摘した様に、風によるしぶきの移流と重力による沈降が釣り合った移流沈降領域が形成され、 Z が十分大きい所や十分流下した所では、しぶきがエアロゾル状となり、流体粒子の移流と拡散が釣り合った移流拡散領域が形成されると考えられる。

図-5 は、しぶき濃度の鉛直分布を模式的に示す。ここで、 C_* : しぶき濃度が一定値に漸近する値、 Z_c : 各測定位置でのしぶき濃度が C_* になる限界高さ、すなわち、移流沈降領域から移流拡散領域へと遷移する限界高さ、

$C(X, 0)$: 各測定位置での $Z=0$ におけるしぶき濃度、 l : しぶき濃度の鉛直分布が $C(X, 0)/e$ に減少する高さである。表-1 には、移流沈降領域における l の流下方向の平均値が示されている。

(2) しぶき濃度の定量化

宇多他の研究 (1992) によれば、移流沈降領域におけるしぶき濃度 $C(X, Z)$ は、次式で表わされる。

$$C(X, Z) = C(0, 0) \exp\left(-\frac{w_0 \cdot X}{U_m \cdot l}\right) \exp\left(-\frac{Z}{l}\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $C(0, 0)$: $X=0, Z=0$ におけるしぶきの濃度、 w_0 : しぶきの沈降速度である。しぶき濃度の鉛直分布を、各測定位置での $C(X, 0)$ と l を用いて無次元化を行い、各実験について X をパラメータとして示したものが図-6 および図-7 である。図中の直線は、

$$\frac{C(X, Z)}{C(X, 0)} = \exp\left(-\frac{Z}{l}\right) \dots\dots\dots (2)$$

である。全体として、実験値は式(2)の直線にほぼ一致していることがわかる。これらの図において、式(2)よ

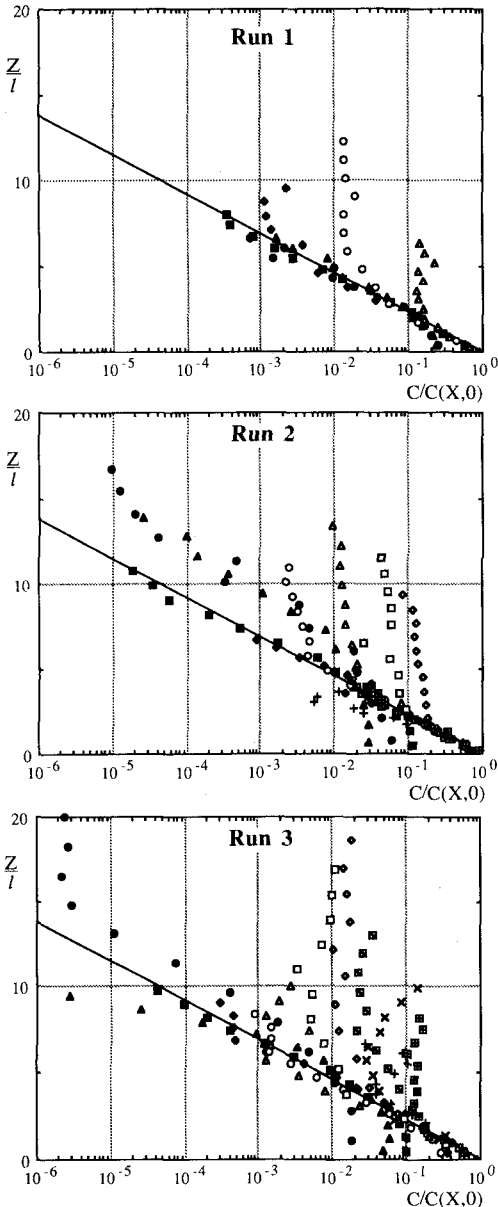


図-6 無次元しぶき濃度の鉛直分布 (Run 1, 2, 3)

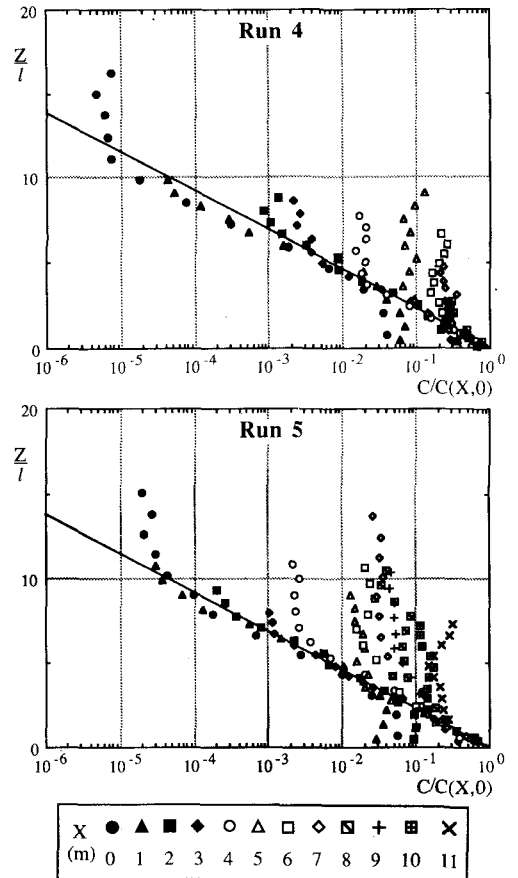


図-7 無次元しぶき濃度の鉛直分布 (Run 4, 5)

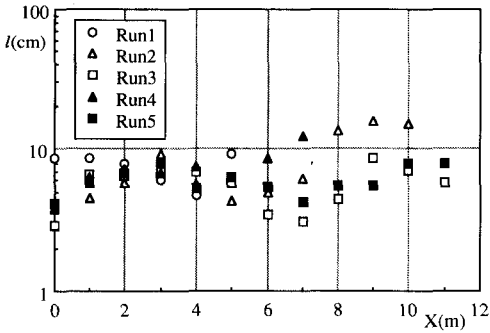


図-8 l と X との関係

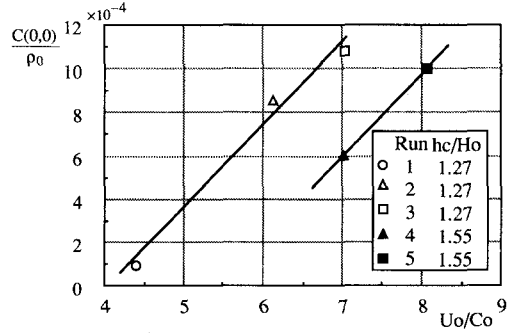


図-10 C(0, 0)/ρ₀ と U₀/C₀ との関係

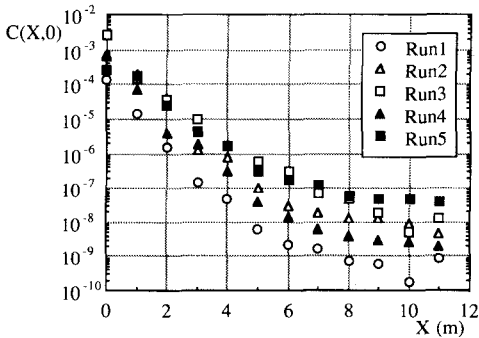


図-9 C(X, 0) と X との関係

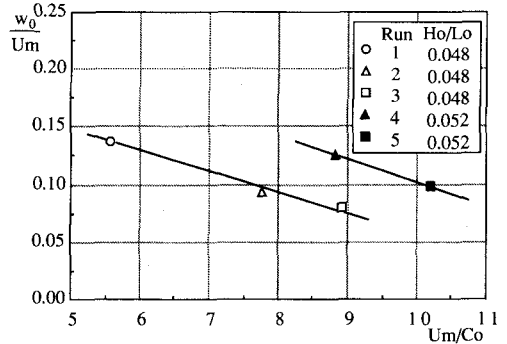


図-11 w₀/U_m と U_m/C₀ との関係

り下方にある実験値は護岸近傍の値である。これは、図-3および図-4からわかる様に、護岸近傍では、しぶき濃度がZ=20 cmの高さまでほぼ一定であるためである。また、式(2)より上方に出ている実験値は、Zが十分大きい所や十分流下した所であり、エアロゾル状となったしぶきであると考えられる。

図-8は、しぶき濃度がC(X,0)/eに減少する高さlとしぶきの吹送距離Xとの関係を、各実験について示す。多少バラツキがある様に見えるが、X方向に11 mほど流下するのに対して、鉛直方向のlの変化は約5 cmである。したがって、lの値は風下方向にほぼ一定であると考えられる。

図-9は、陸域底面(Z=0 m)でのしぶき濃度C(X,0)の風下方向への変化を、各実験について示す。C(X,0)の値は、風下方向に指数関数的に減少するが、ある程度流下すると、一定値に漸近することがわかる。C(X,0)の値が風下方向に指数関数的に減少している領域が移流沈降領域であり、その後、一定値に漸近している領域が移流拡散領域であると考えられる。したがって、X≤6m~7mの範囲が移流沈降領域と考えて良い。また、風速が大きくなるほどC(X,0)のX方向の減少率は小さくなり、一定値に漸近するC(X,0)の値は大きくなることがわか

る。さらに、風速が同じであるRun 2とRun 4、およびRun 3とRun 5を比較すると、C(X,0)のX方向の変化は、沖波波形勾配H₀/L₀にあまり依存しないようである。C(X,0)に関する以上の考察からわかる様に、移流沈降領域におけるZ=0でのしぶき濃度C(X,0)は、exp(-ax)に比例することがわかる。なお、表-1に示すC(0,0)の値は、図-9において、X=0 mでのC(X,0)の値を読み取ったものである。

図-10は、C(0,0)をしぶきの密度ρ₀で無次元化した値を、相対天端高hc/H₀をパラメータとして、U₀/C₀に対してプロットしたものである。hc/H₀が小さい方がC(0,0)/ρ₀は大きく、発生するしぶき量が多いことがわかる。また、風速が大きくなるほどC(0,0)/ρ₀は大きいことがわかる。式(1)において、Z=0とおくことにより、次式を得る。

$$C(X, 0) = C(0, 0) \exp\left(-\frac{w_0}{U_m} \cdot \frac{X}{l}\right) \dots\dots\dots (3)$$

この場合、-w₀/U_m・lは、図-9の移流沈降領域の直線の傾きとして求められる。また、lの値として、表-1の平均値を用いることにより、w₀/U_mが求められる。

図-11は、w₀/U_mとU_m/C₀との関係を、沖波波形勾配H₀/L₀をパラメータとして示す。w₀/U_mは、風速が大き

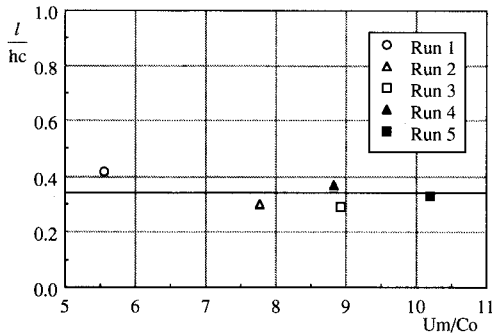


図-12 l/h_c との U_m/Co との関係

なるにつれて小さくなる。これは、風速の増大率に比して、しぶきの粒径の増大率が小さいためであると考えられる。また、 H_0/L_0 が大きいほど w_0/U_m は大きくなる。これは、 H_0/L_0 が大きいほど発生するしぶきの粒径は大きくなるためであると考えられる。

図-12 は、移流沈降領域における流下方向の l の平均値(表-1 を参照)を h_c で無次元化した値 l/h_c と、 U_m/Co との関係を示す。各実験に対して示す。 l/h_c の値は、 U_m/Co に依存せずば一定であることがわかる。

以上の考察により、別府港の消波護岸により発生したしぶきの、移流沈降領域における任意の位置での濃度は、図-10、図-11、図-12 を用いることにより、式(1)で求められる。図-13 は、そのフローチャートを示す。

4. 結 語

本研究で得られた成果は、つぎのように要約される。

(1) 消波護岸付近の領域では、風によるしぶきの移流と重力による沈降が釣り合った移流沈降領域が形成される。鉛直方向に十分高い所や風下方向に十分流下した所では、しぶきがエアロゾル状となり、流体粒子の移流と拡散が釣り合った移流拡散領域が形成される。

(2) 消波護岸における、沖波、風速、潮位の条件が与えられると、移流沈降領域における任意の位置でのしぶき濃度は、図-10、図-11、図-12 を用いて、 $C(0,0)$ 、 w_0/U_m 、 l を求めることにより、式(1)で算定される。

本研究では、移流拡散領域におけるしぶき濃度の定量化を行なうのに重要な C_* と Z_c の検討は行なっていない。

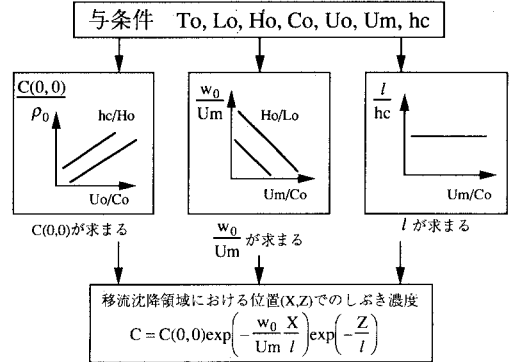


図-13 しぶき濃度を算定するためのフローチャート

い。今後、風速や波の条件を種々に変化させて、移流拡散領域の詳細な検討を行なうとともに、現地観測を行なって比較・検討したい。

謝辞：最後に、本研究を行なうに際し、当時、九州大学大学院生(現、(株)フジタ)の水井宏征君、日本文理大学土木工学科技術員廣瀬智彦君および海洋環境研の卒業研究生に多大なる協力を得たことを記し、ここに深く感謝の意を表します。また、本研究は、平成四年度文部省科学研究費補助金総合研究 A (代表 入江功 九州大学教授)「強風による沿岸部での塩害とその対策に関する研究」の援助のもとで行なわれたことを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

石田昭・花田昌彦・細井正延 (1982): 飛沫の発生に関する実験的研究, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 385-388.
 宇多高明・小俣篤・小西正純 (1992): 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.
 高田彰(1972): 越波の飛散分布について, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp. 285-295.
 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦 (1990): 沿岸微気候の一要素としての飛塩量特性, 環境システム研究, Vol. 18, pp. 88-93.
 仲座栄三・津嘉山正光・山路功祐・日野幹雄 (1993): 飛塩(海塩粒子)拡散の数値流体力学的解析, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 1036-1040.
 村上和男・加藤一正・清水勝義・福田真人・宮崎啓司 (1992): 砕波帯内における海塩粒子の発生に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 1046-1050.