

飛沫の発生に関する実験的研究

石田 昭*・花田昌彦**・細井正延***

1. はしがき

近年沿岸地域の有効な土地利用を行なう必要性から、大水深部での埋立を行なったり、道路橋等の橋脚を海中に構築したりする機会が生じている。そうした場合に構造物前面での波浪エネルギーを消散させる工夫もさることながら、沿岸地域の環境保全の立場から飛沫の発生を軽減する工夫も重要な問題となっている。従来飛沫の発生問題に関しては実験的検討が相似則ともからんで困難であるためほとんど研究されていないのが実情である。本研究は飛沫に関する基礎的な資料を得るとともに模型実験を行なう場合の方法について検討を加えたものである。

2. 飛沫に関する基礎的実験

(1) 飛沫の発生原因

飛沫の発生する原因を分けると次のようになる。

- 原因 1 波峰近くの水が風の作用によって水面から引離されて発生する。風速 U に支配される。
- 原因 2 水塊が構造物等に衝突するために発生する。衝突速度 V に支配される。
- 原因 3 構造物の前面で遡上した水塊が風の作用で飛沫となる。風速 U に支配される。

(2) 飛沫実験の相似則

飛沫に関する実験で困難な点はその相似則である。飛沫が発生する機構は上述したどの原因による場合も水の表面張力が影響すると考えられるからウェーバー則を当てるべきであろう。一方飛沫が飛散する機構は重力が影響するからフルード則を当てるべきである。両者を同時に満足させることが困難であることが研究が進まない原因である。さて図-1に示すような水平スリットを持つノズルを補助送風機（日立ボルテックスブロウ VBM-20）に接続して風速 U と飛沫の直径 d との関係を調べたのが図-2である。この装置はノズルの開度を変えることによって風速を調節できるようになっている。ノズ

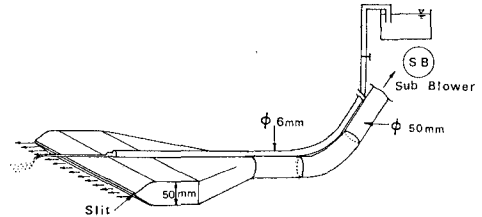


図-1 補助送風装置および吹出しノズル

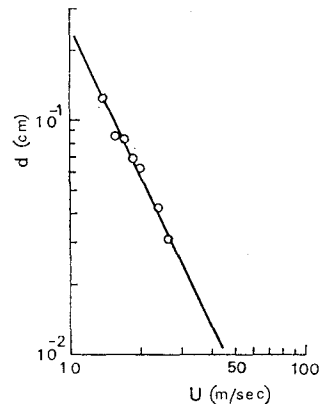


図-2 飛沫の直径 d と風速 U の関係

ル前方に注射針の先端を固定し、そこから水滴を落下させて飛沫を発生させた。飛沫の観測にはシカロールと食紅を約 5 : 1 で混合した粉を使用した。この粉を濾紙の表面に塗布しておく、飛沫が付着した場合に赤色に変化するので飛沫の観測が可能となる。一定時間内に流出した水量を濾紙上の飛沫の数で除した値を一粒の球の体積と考えて直径 d を換算した。風速はピトー管及び熱線式風速計で計測した。風速 U と直径 d との間には cm, sec 単位で

$$d = 21 \times U^{-2} \times 10^4 \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係が成り立ち、飛沫の発生機構はウェーバー則

$$We = \frac{\rho}{\sigma} d U^2, \quad \rho: \text{密度}, \sigma: \text{表面張力}$$

に従うことが明らかである。次にこの時の濾紙上に付着した飛沫の直径 d' (cm) と飛沫一粒の体積 q (cc) との関係プロットしたのが図-3であり、 d' と q の間に

* 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部土木工学科

** 名古屋鉄道株式会社

*** 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部土木工学科

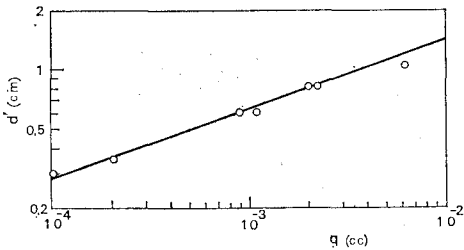


図-3 観測紙に付着した時の直径 d' と飛沫の体積 q の関係

は次の関係がなりたつ。

$$q = 2.04 \times 10^{-5} d'^{2.22} \dots\dots\dots (2)$$

以後の実験では観測用濾紙上の飛沫の大きさを数ランクに分けてその個数を計測し、式(2)の関係を利用して飛沫量 Q に換算した。

図-4 は 1/30 の海浜模型(図-7 に示す模型で3基の橋脚と2台の補助送風装置を設置しないもの)で波高3m, 周期7秒の波をフルード則で換算して与え、風洞

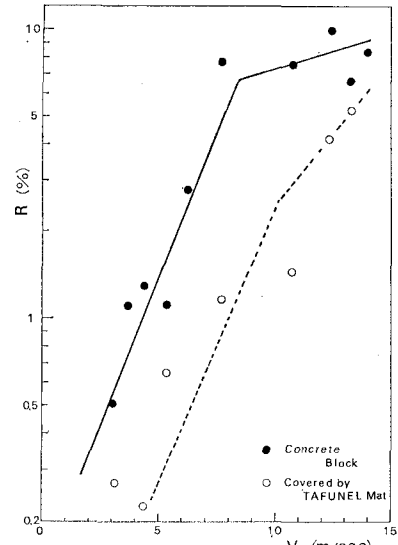


図-5 水塊の衝突速度 V と飛沫化率 R の関係

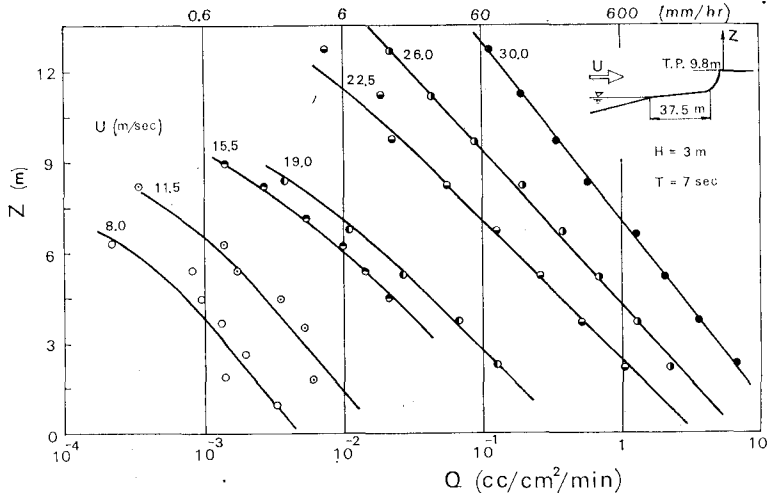


図-4 各風速下における飛沫の鉛直分布(縮尺 1/30)

内風速 U は 8.0 m/sec から 30.0 m/sec までの間で変化させて発生する飛沫を計測した実験結果である。ただし 22.5 m/sec 以上の場合は飛沫量が多いので試験管を鉛直方向に設置してその中に入る飛沫を計測した。この実験結果をみると、例えば現地風速 20 m/sec をフルード則で換算して $U_m = \sqrt{1/30} U_p = 3.6$ m/sec を与えても飛沫はまったく発生しないこと、逆に風速をウェーバー則で換算して $U_m = \sqrt{30} U_p = 109$ m/sec を与えれば飛沫量が極端に多くなってしまうことがわかる。簡便法として後述するように飛沫の発生する領域では現地と同じ風速にして実験する方法が妥当であろう。

(3) 水塊の衝突によって発生する飛沫

図-5 は自由落下する水塊をコンクリートブロックおよび厚さ 4mm のタフネルマット(三井石油化学 KK 社

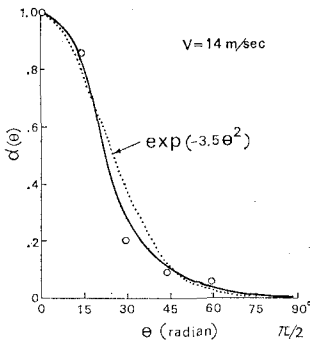
製)で被覆したブロックに垂直に衝突させたときの水塊の飛沫化率を調べたものである。内径 6mm 長さ 26mm の円管内の水を一個の水塊にして、0.5m~10m の高さから自由落下させた。衝突点の左右 9cm の所に鉛直に2枚の観測紙を立て、観測紙に付着した飛沫を計測した。したがって飛沫化率 R (%)とは衝突点を中心に18cm 四方の四角形の外部に飛散する飛沫量のパーセンテージを表示している。図-5を見ると衝突速度 V が 8 m/sec を越えると約1割程度の飛沫化率となるが、8 m/sec 未満では飛沫化率が指数関数的に

小さくなっている。この図から、例えば現地で周期7秒の波が水深10mの所で砕波し、位相速度 $C=8.54$ m/sec と同じ速度で水塊が構造物に衝突する場合を想定すると、フルード則で換算した実験波速 $C_m = \sqrt{1/30} C = 1.56$ m/sec ではほとんど飛沫が発生しないことがわかる。また構造物表面をマット等で被覆し、弾力性を持たせると原因2による飛沫量はかなり軽減されることがわかる。

図-6 は衝突角度による飛沫化係数 $\alpha(\theta)$ を示したもので垂直に衝突する場合の比沫化率を1.0とした値である。衝突する角度が 20° 前後で急激に $\alpha(\theta)$ の値が小さくなることがわかる。 $\alpha(\theta)$ と θ (radian) の関係を近似的に

$$\alpha(\theta) = \exp(-3.5\theta^2) \dots\dots\dots (3)$$

と表示する。この関係から六角柱および円柱に衝突する


 図-6 水塊の衝突角度 θ と飛沫化係数 α の関係

場合の飛沫化の度合を四角柱の一つの面に垂直に衝突する場合と比較して求める。四角柱の場合は $\alpha(0)=1.0$ であるが、六角柱の場合は

$$\frac{1}{2} \left\{ \alpha(0) + \alpha\left(\frac{\pi}{3}\right) \right\} = 0.522$$

円柱の場合は

$$\int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \cdot \cos \theta d\theta = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{3.5}} \cdot e^{-1/4 \times 3.5} = 0.441$$

となり、円柱構造のほうが飛沫の発生が少ないと云える。このことは消波ブロックなどでも丸味のある形状のほうが飛沫の発生が少ないという現場技術者の言とも一致する。

3. 飛沫に関する模型実験

前述したように飛沫の発生原因は3つ考えられる。原因1だけで発生する場合には、飛沫の発生機構を原型と同じにし、飛散機構だけにフルード則を当てる方法が考えられる。この場合 図-1 に示した補助送風装置 (S.B) の吹出しノズルを波と衝突しない高さで砕波点付近に設置し、現地風速と同じ風速を与える。そして風洞内の主風速と区別するために1m程度の仕切り板を設けるとよい。ノズルからの風量は与える風速、ノズルの開度によって異なるが主風速に影響を与えない程度の風量とする必要がある。原因3による飛沫の場合には同様の補助送風装置によって構造物前面に現地と同じ風速を与えてやる方法が考えられる。原因2の場合には衝突速度 V を現地と同じにすることができないから実験不可能である。ただし簡便法として 図-5 の関係から得られる飛沫化率に応じて衝突水塊を R 倍した水量を 図-1 に示す高水槽タンクから流下させて飛沫を発生させる方法が考えられる。飛沫の発生する領域で現地と同じ飛沫化率を与えているから実験結果の飛沫量 Q は縮尺の効果を入れずにそのまま表示し、飛散距離や鉛直距離だけを幾何学的縮尺率で換算して表示する。

次に二三の実験例を示す。使用した水槽は幅 60 cm、高さ 120 cm の両面ガラス張り風洞水槽で、一端にはピ

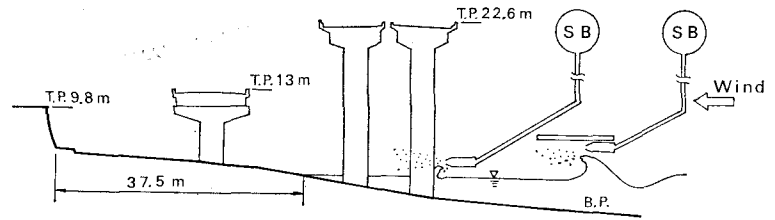


図-7 橋脚を設置した模型実験の例

ストン型の造波装置を設置し、風速は連続的に可変である。海浜部の模型設置部分では水槽断面が急増されないように高さを1m高くしてある。図-7は高架方式による道路を汀線より沖側に構築する場合に既設道路及びその背後地への飛沫の影響を検討しようとする実験方法を示したものである。砕波によって生ずる高速度の水塊が直接橋脚に衝突することはないので、発生原因2による飛沫はそれほど大きな量ではないと仮定し、原因1と3による飛沫が多いと考えた。

現地での条件として、波高 4.5 m、周期 12 秒、風速 20 m/sec を与え、縮尺 1/30 でフルード則によって実験条件を決めた。2台の補助送風装置による風速は 20 m/sec となるように調節した。図-8は背後の既設道路上での

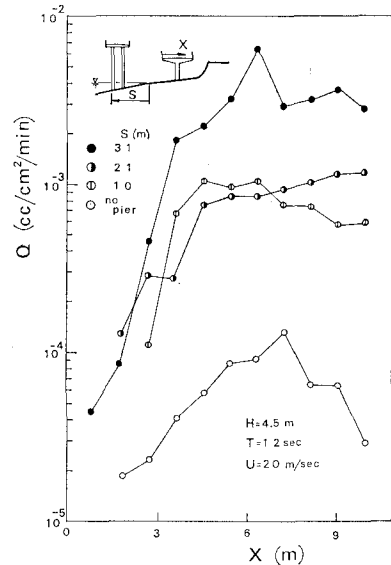


図-8 既設道路上での飛沫の水平分布

飛沫の水平分布を表わしたものである。橋脚を砕波帯の岸側端である $S=31\text{m}$ に設置した場合に最大の飛沫量となること、また $X=4\sim 5\text{m}$ までは高欄の影響で飛沫量が少ないことなどがわかる。橋脚を設置しない場合にくらべて飛沫量が多くなるが砕波帯より岸側ならば時間降雨量に換算して 0.6 mm/hr という微量である。図-9は背後地にある T.P. 9.8 m の護岸上における鉛直分布を調べたものである。やはり橋脚を沖に出すほど飛沫

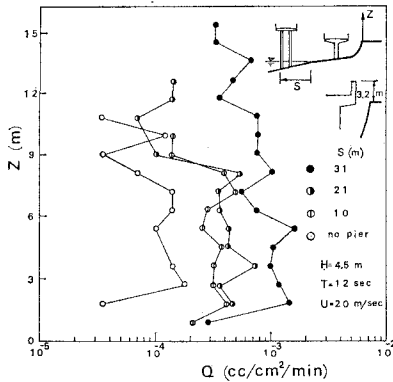


図-9 後背地護岸上での飛沫の鉛直分布

量が多くなる傾向がみられる。分布状態が 図-4 の基礎実験での分布と異なるのは前方にある既設道路の影響があるためであろう。 図-10 は護岸

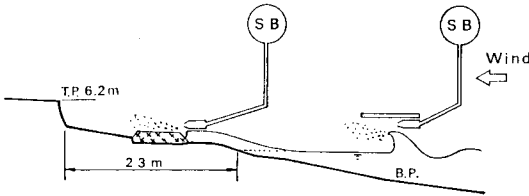


図-10 消波ブロックを設置した模型実験の例

前面に設置した消波ブロックから発生する飛沫を調べるための実験方法を示したものである。消波ブロックは汀線より岸側にあるので水塊の衝突速度はそれほど大きくはなく発生原因は1と3を考えている。波浪、風速、縮尺等の条件は前の実験例と同じである。 図-11 は T.P. 6.2m の護岸上で計測した飛沫の鉛直分布を示したものである。消波ブロックを汀線に近づけるほど飛沫量が多

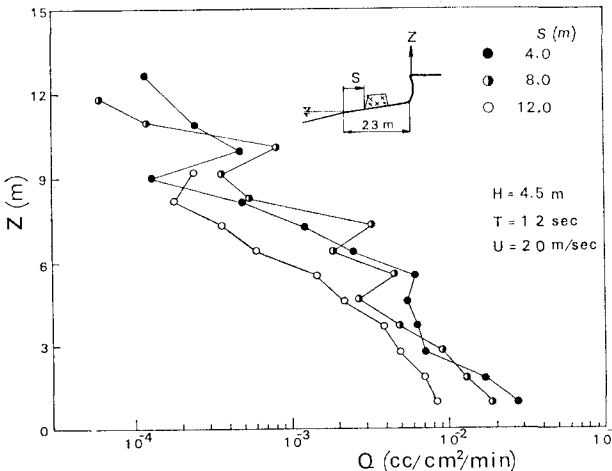


図-11 護岸上での飛沫の鉛直分布

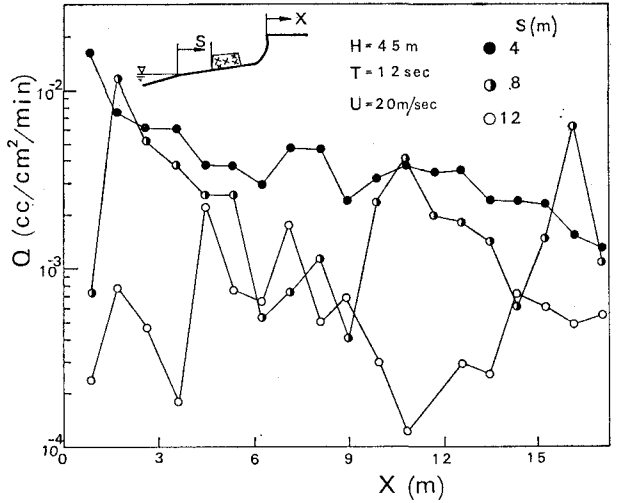


図-12 護岸上での飛沫の水平分布

くなっている傾向がわかる。 図-12 は護岸先端から取った水平軸上での飛沫の分布を示したものである。やはりブロックを汀線近くに置くほうが飛沫量が多くなること、先端から 15m 程度の場所で飛沫量は先端での 1 割に減少することなどがわかる。

4. 結 論

飛沫に関する実験が困難であるのはその相似則を満足させることが困難であることが最大の理由である。本研究では飛沫に関する基礎資料を得るとともに飛沫の発生機構は現地と同じ規模とし、飛散機構だけにフルード則を当てるという簡便法によって模型実験を行なう方法を示したものである。結論として以下のことがらが得られた。

- 1) 飛沫の直径 d と風速の間にはウェーバー則を満足する関係がある。
- 2) 水塊が構造物等に衝突することによって発生する飛沫の場合、衝突する角度が 20° 前後で急激に飛沫化率が小さくなる。このことは海中に立てる橋脚あるいは消波ブロックなどの形状に平面よりも曲面を入れたほうが飛沫の発生が少なくなることを示している。また表面をマットなどで被覆すると効果があることもわかった。
- 3) 飛沫に関する模型実験を行なう方法として、飛沫の発生原因別に提案することができた。

本研究を行なうに際し日本国土開発技術センター並びに日本道路公団の協力を得たことを付記し、謝意を表する。