

II-322 水面に作用する風の剪断力の研究

九州大学応用力学研究所 正会員 ○本 多 忠 夫
光 易 恒

1. まえがき

高潮の発生外力である海面に作用する風の剪断力に関しては、古くから多くの研究が行なわれている。しかし、實際上重要な高風速時のデータは十分とは言えない。今回の研究は、高速風洞水槽を利用して風速 3 m/s から、 30 m/s の広範囲にわたり、水面に作用する風の剪断力の特性を詳しく調べたものである。また、風の剪断力に対する風波の効果を明らかにするために、界面活性剤を使用して風波の発生を抑制した場合とそうでない場合について、風の剪断力の差を詳しく調べた。

2. 実験装置および方法

実験は高速風洞水槽（長さ 17 m 、幅 0.6 m 、高さ 0.8 m ）を使用して行なわれた。断面平均風速で、 $U = 5, 7.5, 10, 12.5\text{ m/s}$ の各ケースについて、風洞水路の代表的な各断面においてピトー管を用いて、風速の鉛直分布を測定した。また、電気抵抗型波高計による風波の計測も行なわれた。

水槽内の水に界面活性剤（ラウリル硫酸ナトリウム）を混入して風波の発生を抑制した場合と、水道水のみで風波の発生をゆるした場合について、それぞれほぼ同様の測定を行なった。これは、界面活性剤により風波の発生が抑制される機構を調べることと、水面に作用する風の剪断力のうち風波の存在によって受け持たれている部分を明らかにすることなどの目的で行なわれたものである。

3. 実験結果

水面上における風速の鉛直分布 $U(z)$ は、界面活性剤を用いて風波の発生を抑制した場合にもそうでない場合にも、水面近くではほぼ対数分布

$$U(z) = \frac{U_*}{K} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

に従うことがわかった。ここに、 U_* は $U_* = \sqrt{\tau/\rho_a}$ で定義される風の摩擦速度（ τ : 水面に作用する風の剪断力、 ρ_a : 空気密度）、 K : カルマン常数（ 0.4 ）、 z_0 : 水面の粗度パラメータである。この事実をもとにして、水面近くの風の鉛直分布から風の摩擦速度 U_* および粗度パラメータ z_0 を求めた。

また、このようにして求めた U_* および z_0 の値をもとにして、(1) 式の分布から外挿により海面上 $z = 10\text{ m}$ における風速 U_{10} を求めた。

図-1 は、上述の方法で求めた水面上の風の摩擦速度 U_* と、水面上 10 m における風速 U_{10} との関係を示したものである。*印は、界面活性剤を用いて風波の発生を抑制した場合、それ以外の記号はそうでない場合（普通的水道水の場合）のデータである。また、↑の記号は以前、国司、今里（1966）が得たデータを比較のため示したものである。図-1 のデータをもとにして、次のような結果が得られる。

(1) 水に界面活性剤を投入して、風波の発生を抑制した場合の U_* と U_{10} との関係は次式で与えられる。

$$U_* = 3.87 \times 10^{-2} U_{10}^{0.906} \quad (2)$$

摩擦速度 U_* の定義から、水面に作用する風の剪断力 τ_0 は、この場合次のようになる。

$$\tau_0 = 1.50 \times 10^{-3} \rho_a U_{10}^{1.81} \quad (3)$$

あるいは、水面の抵抗係数 γ_{10}^2 を $\tau_0 = \rho_a \gamma_{10}^2 U_{10}^2$ で定義すれば、 γ_{10}^2 は次のようになる。

$$\gamma_{10}^2 = 1.50 \times 10^{-3} U_{10}^{0.19} \quad (4)$$

(2) 界面活性剤を加えないで普通に風波の発生をゆるした場合の U^* と U_{10} との関係は、次式で与えられる。

$$U^* = 2.28 \times 10^{-2} U_{10}^{1.20} \quad (5)$$

これより、 $\tau_0 = 5.20 \times 10^{-4} U_{10}^{2.40}$, $\gamma_{10}^2 = 5.20 \times 10^{-4} U_{10}^{0.40}$ などの関係式が得られる。 (6)

しかしながら図-1 を注意深くみると、水道水の場合の U^* と U_{10} との関係は、必ずしも直線的に変化していないことがわかる。すなわち、 $U_{10} \leq 8 \text{ m/s}$ 以下では界面活性剤を使用した場合の関係式(2)に従い、 $8 \text{ m/s} < U_{10}$ では、式(2)より次第にはずれ、直線的に変化している傾向がある。これらのことを考慮すると、次のような結果が得られる。

(3) $U_{10} < 8 \text{ m/s}$ においては、 U^* と U_{10} との関係は界面活性剤を使用して風波の発生を抑制した場合と、そうでない場合とで大差がなく、ともに(2)式で与えられる。界面活性剤を用い風波の発生を抑制した場合には、 $8 \text{ m/s} \leq U_{10} \leq 20 \text{ m/s}$ においても(2)式が成立するが、風波が発生する場合には $8 \text{ m/s} < U_{10}$ では、 U^* と U_{10} との関係は次式で近似される。

$$U^* = 1.43 \times 10^{-2} U_{10}^{1.37} \quad (U_{10} > 8 \text{ m/s}) \quad (7)$$

これから、 $\tau_0 = 2.04 \times 10^{-4} U_{10}^{2.74}$, $\gamma_{10}^2 = 2.04 \times 10^{-4} U_{10}^{0.74}$, (8)

などの関係式が得られる。図-1 にみられるように、国司・今里(1966)により得られた結果は、この(7)式に極めてよく従っている。

4. 従来の結果との比較

水面に作用する風の剪断力に関しては、データは比較的低風速に限られてはいるが($U_{10} \leq 15 \text{ m/s}$)、従来いくつかの実験式が提出されている。例えば、Deacon & Webb (196) の式 $\gamma_{10}^2 = (1.00 + 0.07 U_{10}) \times 10^{-3}$ Van Dorn (19) の式、

$$\gamma_{10}^2 = \begin{cases} 1.04 \times 10^{-3} & , U_{10} < 5.6 \text{ m/s} \\ 1.04 \times 10^{-3} + 1.92 \times 10^{-3} (1 - 5.6/U_{10})^2 & , U_{10} \geq 5.6 \text{ m/s} \end{cases}$$

などがそれである。これらは、定性的には今回のデータに一致するが、定量的一致は必ずしもよくない。我々の今回のデータをもとにして、Deacon & Webb 型の式を導くと次のようになる。

$$\gamma_{10}^2 = (1.00 + 0.0882 U_{10}) \times 6.68 \times 10^{-4} \quad (9)$$

また、我々が3.で導いた(4)式と(8)式を組合わせたものが、Van Dornの式の改良式とも言えるものである。

5. 結論

風速 $3 \text{ m/s} \sim 30 \text{ m/s}$ の範囲の実験データをもとにして、水面に作用する風の剪断力に関する高精度の実験式が得られた。実用的には、(4)式と(8)式とを組合わせたもの、あるいは(9)式を使用することによって水面に作用する風の剪断力を推定することができる。

