

# 逆勾配のり面の水理特性について(2)

—越波機構—

井上雅夫\*・海津憲一\*\*・灰谷繁\*\*\*

## 1. 緒言

著者らはさきに、大水深に設置される護岸構造を究明する目的で、逆勾配のり面への波の遡上、越波および反射などの特性を実験的に検討した<sup>1)</sup>。すなわち、波の遡上高については、傾斜角が90°~120°で最小値を示し、120°以上になると、急激に増大することを示した。また越波量については、傾斜角が120°で極小値を示したのち、135°で極大値となり、ふたたび減少する場合のあることを明らかにした。さらに、反射率と傾斜角との関係についても、越波量と同様な関係があることを示した。特に、越波量が傾斜角が120°の場合に極小値を示すことはきわめて興味深く、逆勾配のり面の大きな特性である。

こうしたことから第2報においては、鉛直堤の越波機構を解明した手法<sup>2)</sup>とほぼ同様な取扱いによって、逆勾配のり面の越波機構を考察し、第1報で示した越波に関する実験結果と比較して、その妥当性を検討したい。

## 2. 越波機構と計算結果

ここでは、波高の小さい周期波が碎波することなく越波する場合の機構を考察することにする。

いま、図-1に示すように  $x$  および  $y$  軸をとり、速度ポテンシャル  $\phi$  で  $\partial\phi/\partial t$  と表わされる項を無視すれば、越波時の流速に対して、近似的に次式が得られる<sup>3)</sup>。

$$\eta + (1/2g)(u_w^2 + w_w^2) = (u^2/2g) + (H_c + y') \dots (1)$$

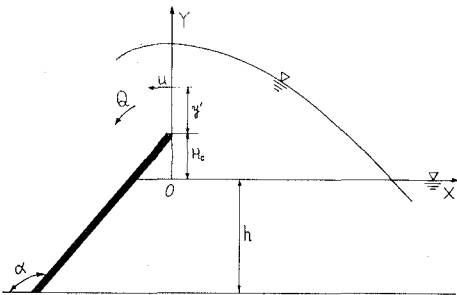


図-1 座標軸と記号の説明

ここに、 $\eta$ ,  $u_w$  および  $w_w$  は、それぞれ重複波の波形、水平および鉛直方向の水粒子速度である。しかし、ここでは波高が小さいことを考慮して、 $u_w^2$  および  $w_w^2$  を無視すると、越波時の流速  $u$  は次式で表わされる。

$$u = \sqrt{2g(\eta - H_c - y')} \dots (2)$$

さらに、 $\eta$  は部分重複波として、式(3)を仮定する。

$$\eta = [H(1+r)/2] \sin \sigma t \cos kx - [H(1-r)/2] \cos \sigma t \sin kx \dots (3)$$

ここに、 $H$  は進行波の波高、 $r$  は反射率、 $\sigma = 2\pi/T$ ,  $k = 2\pi/L$  である。

式(3)を式(2)に代入すると、越波時の流速  $u$  は次式で表わされる。

$$u = \sqrt{2gH} \left[ \frac{(1+r)}{2} \sin \sigma t - \left( \frac{H_c}{H} \right) - \left( \frac{y'}{H} \right) \right]^{1/2} \dots (4)$$

式(4)から明らかなように、越波時の流速は最高水位のとき最大となる。また流速の鉛直分布については、 $y' = 0$ , すなわち天端直上で最大であり、波面に近づくほど直線的に減少することがわかる。さらに、越波時の平均流速  $\bar{u}$  は式(4)から次式のように表わされる。

$$\bar{u} = \frac{1}{(\eta - H_c)} \int_{H_c}^{\eta} u dy = \frac{2H\sqrt{2gH}}{3(\eta - H_c)} \times \left[ \frac{(1+r)}{2} \sin \sigma t - \left( \frac{H_c}{H} \right) \right]^{3/2} \dots (5)$$

また、 $\bar{u} = 0$ , すなわち、

$$\sigma t = \sin^{-1} [2/(1+r)] (H_c/H) \dots (6)$$

で表わされる  $\sigma t_1$  および  $\sigma t_2$  は、それぞれ越波の開始および終了の位相を表わす。

以上から、逆勾配のり面の越波量も鉛直堤の場合と同様に、水位と流速の積によって求めることができるとすれば、のり面単位幅1周期当りの越波量は次式のように表わされる。

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} (\eta - H_c) \bar{u} dt = \frac{2}{3} H \sqrt{2gH} \times \int_{t_1}^{t_2} \left[ \frac{(1+r)}{2} \sin \sigma t - \left( \frac{H_c}{H} \right) \right]^{3/2} dt \dots (7)$$

以上の諸式からわかるように、越波時の流速や越波量は、入射波高や静水面上の天端高のほかに反射率の関数になり、逆勾配のり面の傾斜角の影響は反射率に含まれ

\* 正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科  
 \*\* 兵庫県土地開発公社技術員  
 \*\*\* 大阪府土木部技術員

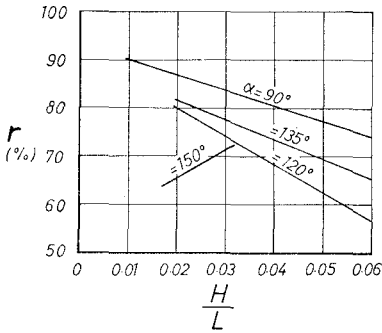


図-2 反射率と波形勾配との関係 (岩垣ら<sup>2)</sup>による)

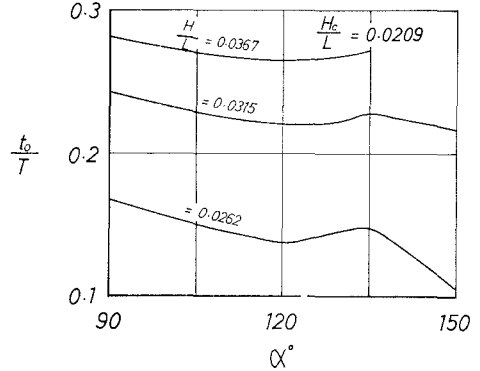


図-4 越波時間におよぼす傾斜角の影響

ることになる。したがって、逆勾配のり面の越波量の計算には、反射率の推定がきわめて重要であるが、ここでは図-2に示した岩垣らの実験結果<sup>4)</sup>を用いることにした。

岩垣らの実験は、水深 20 cm、周期 1.0 sec、波高 5~8 cm の範囲について、Healy の方法で反射率を求めたものであり、実験条件が若干異なるが、その影響は考えないことにした。なお、傾斜角が 150° の反射率は第 1 報に示したものである。

図-3 は、縦軸に式 (4) で求めた天端直上の流速の最大値  $u_{max}$  の無次元量、横軸に傾斜角をとり、波形勾配をパラメーターとして、越波時の流速におよぼす傾斜角の影響を示したものである。これによると、いずれの波形勾配の波についても、越波時の最大流速は傾斜角が 120° でいったん極小値を示したのち、135° で極大値となり、ふたたび減少している。このことは、式 (4) における反射率の影響が大きく、その反射率を図-2 から推定したためである。逆勾配のり面の越波時の流速は、常識的には傾斜角が大きいほど小さいように考えられるが、この程度までの波形勾配の波については、図-3 に示されるようであり、波形勾配が小さい波ほど、越波時の流速におよぼす傾斜角の影響が大きいようである。

図-4 は、縦軸に式 (6) で求めた越波時間  $t_0$  の無次元

量、横軸に傾斜角をとり、波形勾配をパラメーターとして、越波時間におよぼす傾斜角の影響を示したものである。これによると、越波時間におよぼす傾斜角の影響の仕方は図-3 に示した流速の場合と酷似しており、このことも波形を式 (3) で表わされる部分重複波とし、その反射率を図-2 から推定したためである。

図-5 は、縦軸に式 (7) で求めた越波量の無次元量、横軸に傾斜角をとり、波形勾配をパラメーターとして、越波量におよぼす傾斜角の影響を示したものである。越波量が水位と流速の積であると考える式 (7) では、傾斜角の変化による越波量の変化の仕方は、当然のことながら、越波時の流速や堤防前面の水位に比例する越波時間の変化とまったく同じである。すなわち、計算を行った入射波の波形勾配が 0.0393 よりも小さい波については、越波量は傾斜角が 120° で極小値を示し、135° で極大値となり、それより勾配が大きくなると減少している。このように、式 (7) は、実験的に求めた逆勾配のり面の反射率を導入することによって、前述の逆勾配のり面の複雑な越波特性を少なくとも定性的には説明できることがわかる。

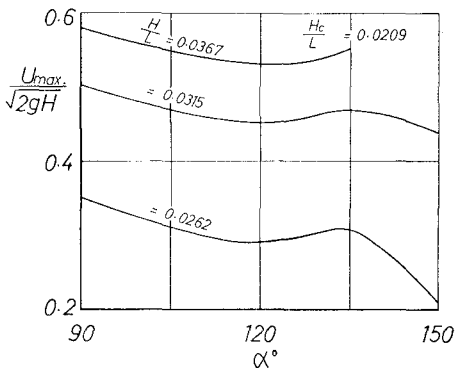


図-3 越波時流速におよぼす傾斜角の影響

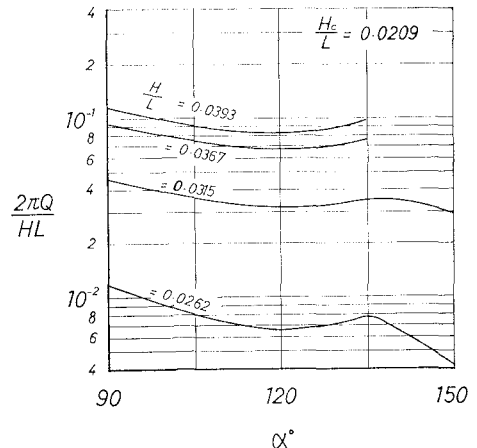


図-5 越波量におよぼす傾斜角の影響

### 3. 実験結果との比較

ここでは、2. で示した計算結果と第1報で示した実験結果との比較を行い、2. の計算方法の妥当性を検討してみよう。

図-6 (a) および (b) は、のり面前面の水位変化の計算値と実験値とを、傾斜角がそれぞれ  $90^\circ$  および  $120^\circ$  の場合について比較した一例である。計算値は式 (3) により、逆勾配の場合には、壁面に沿って測った高さ  $\sin \alpha$  を乗じて補正した。これらによると、鉛直堤の場合には計算値と実験値とはよく一致し、 $120^\circ$  の場合には、波の峰や谷の部分で計算値がやや大きい。また  $135^\circ$  や  $150^\circ$  の場合についても、 $120^\circ$  の場合と同様な傾向が見られたが、ここではいちおう式 (3) が仮定できるものとした。

図-7 は、越波時の流速の計算値と実験値とを比較したものであり、 $U_{cal.}$  は式 (4) に基づいた計算値、 $U_{exp.}$  は中立粒子をトレーサーとして、その走時曲線から求めた流速の実験値である。これによると、傾斜角が  $120^\circ$  で流速が小さい場合には実験値が計算値よりもやや大きい。流速が約  $40 \text{ cm/sec}$  になると、両者はほとんど一致

する。傾斜角が  $135^\circ$  の場合には、特に計算値の小さい流速に対応した実験値がないため明確ではないが、計算値の方が実験値よりもかなり大きいようである。このように、小さい流速に対しては、実験値の方が大きく、流速が大きくなると、逆に計算値の方が大きくなることは、すでに鉛直堤の場合にもみられた傾向である。この原因としては、式 (1) の適用における近似や有限振幅の影響が考えられるが、いちおう、流速が  $40 \text{ cm/sec}$  程度までの場合については、越波時の流速を式 (4) によって推定することができよう。なお、著者が用いたトレーサーによる流速測定方法では、任意時刻における流速分布を測定することは、不可能であり、計算値との比較をす際には不便であり、今後、測定法を改良して、さらに詳細な検討を行う必要がある。

図-8 は、越波時間の計算値  $t_{0 \text{ cal.}}$  と実験値  $t_{0 \text{ exp.}}$  とを比較したものである。これによると、越波時間については若干のばらつきはみられるが、全般的には傾斜角が  $90^\circ$  や  $120^\circ$  の場合には、実験値の方がやや長く、傾斜角が  $135^\circ$  や  $150^\circ$  の場合には、計算値の方が逆にやや長くなるようである。

図-9 は、越波量と波高との関係を示したものであり、図中の曲線は式 (7) である。なお、図-9 (a), (b), (c) および (d) は、傾斜角がそれぞれ  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $135^\circ$  および  $150^\circ$  の場合である。傾斜角が  $150^\circ$  の場合には、波高の範囲がきわめてせまいが、これは波高の大きい波の反射率が図-2 から推定できないためである。

まず、図-9 (a) の鉛直堤の場合については、波高が約  $6 \text{ cm}$  までは実験値がやや大きく、 $6 \sim 7 \text{ cm}$  程度で両者は一致し、 $7 \text{ cm}$  以上では計算値の方が逆に大きくなっている。しかし、いずれにしても両者の差はあまり大きくない。さきに、鉛直堤の越波機構を波形として完全重複波を仮定し、波動運動に基づく接近流速を考慮して考察を行ったが、その適用限界は入射波の波形勾配が  $0.017 \sim 0.018$  以下であった。一方、式 (7) の適用限界は

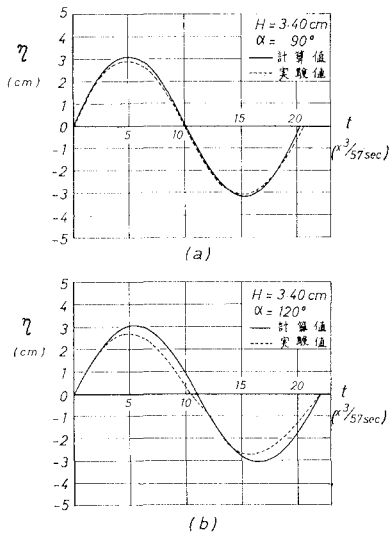


図-6 水位変化の計算値と実験値との比較

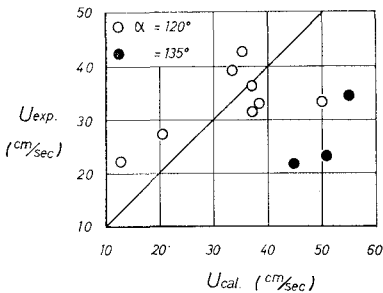


図-7 越波時流速の計算値と実験値との比較

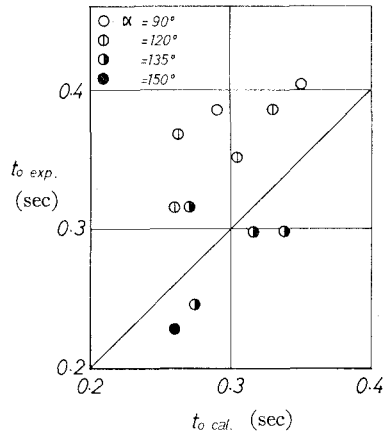
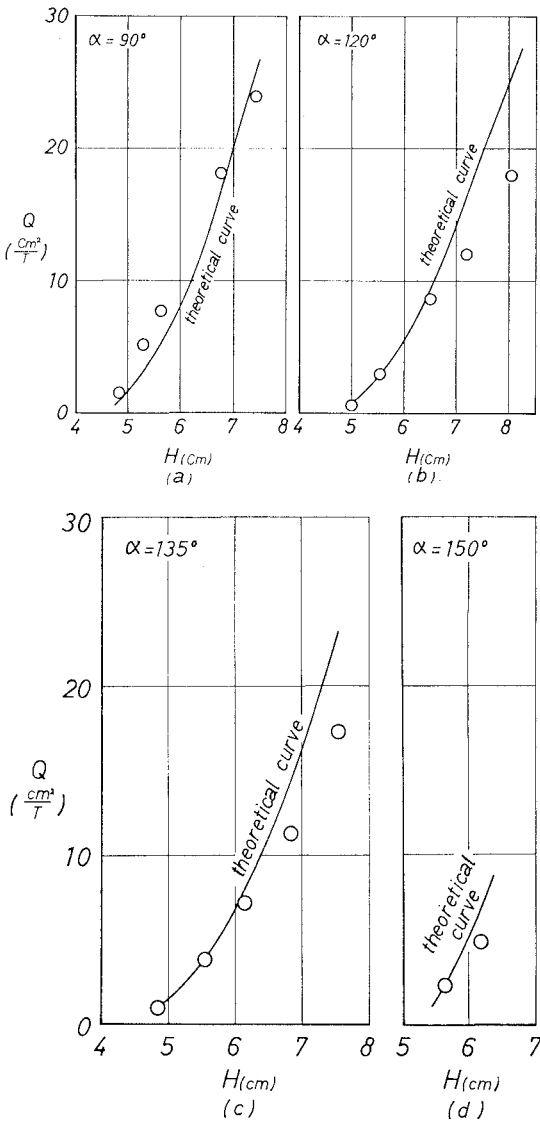


図-8 越波時間の計算値と実験値との比較



図—9 越波量の計算値と実験値との比較

図—9(a)の結果から、波高約7cmと考えれば、波形勾配は約0.037であり、さきに示した越波機構よりも、式(7)によるものの方が、適用限界が大きくなっているといえよう。

次に、図—9(b)および(c)の傾斜角が $120^\circ$ および $135^\circ$ の逆勾配のり面については、いずれも波高が約6cmまでは計算値と実験値とはきわめてよく一致するが、7cmよりも大きくなると、計算値の方がかなり大きくなっている。また、図—9(d)の傾斜角が $150^\circ$ の場合には、前述した理由のために波高の範囲がせまく明確な傾向は見出せないが、 $120^\circ$ や $135^\circ$ の場合とほぼ同様な

傾向を示すものと思われる。この波高が大きくなると計算値の方が大きくなる傾向は、図—7に示した越波時の流速についても見られることであり、越波量はこの流速の影響が大きいためと考えられる。

以上のようなことから、鉛直堤の場合については、波形を完全重複波あるいは部分重複波のいずれを仮定しても、式(1)が成立し、したがって式(7)によって越波量が推算できるのは、波高の小さい場合に限られ、波高が大きい場合には式(1)の仮定から再検討すべきであろう。しかし、波高が小さいという限定された条件のもとであっても、逆勾配のり面の越波量については、その反射率を導入することによって、いちおう式(7)で計算が可能であるといえよう。

#### 4. 結 語

以上、著者は第1報に引き続き、逆勾配のり面の水理特性、特に越波機構を考察した。すなわち、碎波せず重複波の状態で越波する場合に対して、波形を部分重複波とし、越波量の推算式として式(7)を導いた。式(7)は、越波量係数の代わりに反射率を用いて、越波量を計算するのが特徴であり、従来の実験結果からこの反射率を推定して、鉛直堤および逆勾配のり面の越波量を計算し、実験結果と比較した。その結果、鉛直堤および逆勾配のり面のいずれについても、入射波の波形勾配が約0.037より小さいときには、計算値と実験値とはほぼ一致することがわかった。

今後、逆勾配のり面の反射特性を明らかにすることによって、より詳細な越波機構の解明を行うと同時に、実際面への適用を考慮した断面、たとえば水面付近だけを逆勾配とした場合などの影響を明らかにしていきたい。

最後に、この研究を行うにあたり終始ご激励をいただいている京大工学部岩垣雄一教授、同防災研究所土屋義人教授に深謝の意を表するとともに、この研究は文部省自然災害特別研究「海岸における波の制御に関する研究」(代表者: 岩垣教授)による研究の一部であることを明記する。

#### 参 考 文 献

- 1) 井上雅夫: 逆勾配のり面の水理特性について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 417~421, 1974.
- 2) 井上雅夫: 海岸堤防の越波機構について, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 107~112, 1973.
- 3) 岩佐義朗: 水理学, 朝倉土木講座3, 朝倉書店, pp. 210~215, 1967.
- 4) 岩垣雄一・井上雅夫・吉川昌宏: 逆勾配のり面の波の遡上, 反射および波圧について, 昭和40年度土木学会関西支部学術講演会講演概要, pp. 103~104, 1965.