

鉛直壁における越波量と反射率について

横 山 健*・水 口 優**

1. はじめに

越波の研究, 特に鉛直壁に規則波が直角に入射するという基本的な研究はもう過去のもの (例えば, 吉川ら, 1967) と考えられていよう。しかしながら, 入射波と越波時の波形 (または波高) の関係は未だ実験的に与えられるものとして扱われている (例えば, 木村ら, 1981)。ごく最近, 越波と反射という現象をエネルギーに関連付けることにより入射波と越波時の波形とを経験定数を用いること無く関係付けることのできるモデルが提案された (Mizuguchi, 1993)。このモデルは, 越波波形を入・反射波の線形的な重ね合わせと考えた上で, 壁直前での入射波, 越波流および反射波をエネルギーフラックスに着目して直接的に関連づけたものである。ここでは, 越波量と反射率の関係を実験的に調べると共に, そのモデルの妥当性についても, 背後にある考え方も含めて実験的に検討する。なお, このような実験が精度良く行えるようになったのは, 入・反射波の分離に関する研究が進んだ結果である (例えば, 水口, 1991)。

なお, 越波時の波形が有限振幅の部分重複波と見なし得ることは古くから指摘されている (例えば, 土屋・山口, 1970)。また, 高田 (1972) は越波量と反射率について入射波条件, 斜面勾配を媒介としてその関係を探ってはいるが, 越波量と反射率の関係を直接的に扱ってはいない。水口 (1991) は入・反射波の分離手法の研究において, 例題として越波がある場合の鉛直壁からの反射を取り上げ, 両者の関係をエネルギーに着目して関連づけるというアイデアを提案している。

2. 越波と反射率モデル (Mizuguchi, 1993) の概要

規則波による鉛直壁に対する越波の研究は, 1950~60年代によく取り上げられた問題である。単位時間当たりの越波量 q_e については従来 (例えば, 吉川ら, 1967) と同様に堰の越流公式より得られる次式を適用する。

$$q_e = \frac{2\sqrt{2}g}{3T} \int_{\eta_e > H_c} (\eta_e - H_c)^{\frac{3}{2}} dt \dots\dots\dots (1)$$

ここで, g は重力加速度, T は波の周期, η_e は越波の時間波形, H_c は天端高である。なお, 越流係数の値は, 接近流速が小さく, 縮流は無視できるとして 1 に取られている。

モデルのポイントは, 入・反射波と越波のエネルギーフラックスの関係に着目した点であり, その概念図を図-1 に示す。また, 波動理論として一次のクノイド波を用いた場合を式で表すと次のようになる。

$$H_i^2 \sqrt{d} f_{2i} = H_r^2 \sqrt{d} f_{2r} + \frac{2\sqrt{2}g}{3T} \cdot \int_{\eta_e > H_c} \eta_e (\eta_e - H_c)^{\frac{3}{2}} dt \dots\dots\dots (2)$$

ここで, d は水深, H は波高, f_2 はクノイド波理論における波高と波のエネルギーを結び付ける係数で $E = \rho g H^2 f_2$ で表せられる。 f_2 は, アーセル数 $U_s (= gHT^2/d^2)$ の関数で, 微小振幅波では 1/8 である (Isobe, 1985)。添字の i, r はそれぞれ入, 反射波の諸量を意味する。(2) 式は壁直前の諸量の関係であり, 前面に消波工などがある場合はその効果を別に考えてやればよい。

越波時の水面波形は, クノイド波としての入・反射波の (第一次近似として) 水位の線形和として表されとすると, 越波が予期される構造物は, 浅海域に設置されることが多いという理由で, 有限振幅波理論としてはクノイド波が用いられており, 水面波形 η_e は次式のようになる。

$$\eta_e = (H_i + H_r) [cn^2(\theta; \kappa) - \overline{cn^2}] \dots\dots\dots (3)$$

ここで, cn は楕円関数, θ は位相関数, κ は母数である。上付線は一波当たりの平均を意味する。一次オーダーの

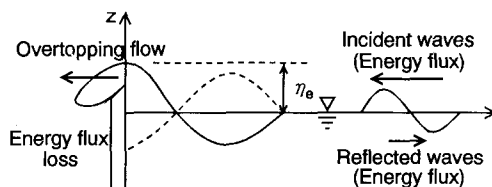


図-1 入射波, 越波, 反射波の間の関係を示す模式図

* 正会員 中央大学大学院理工学研究科 (現横浜水道局)

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

クノイド波の実用的な計算法は、Isobe (1985) に詳しく記されている。

(2)式の右辺第二項は、越波により失われる単位時間当たりのエネルギーを表し、その算定は越波量の計算と同様に行われている。なお、Mizuguchi (1993) では、波動理論として微小振幅波理論を用いる場合のモデルとその計算結果も議論されている。

さて、反射率 $K_r(H_r=K_r H_i)$ は、その値が(3)式の形で η_e に含まれていることに注意すれば、(2)式において、 H_i , T , d , H_e (と重力加速度 g)、すなわち無次元量としては、相対天端高 H_e/d , 相体波高 H_i/d , 相体水深 d/gT^2 を与えれば定まることになる。なお、アーセル数は相対波高と相対水深を組合せたものである。この時の越波量 q_e は、得られた反射率より定まる越波波形を、(1)式に代入することにより計算できる。ただし、(1)式および(2)式中の積分は数値的に行われる。以下の計算では一周を80分割して行った。また、このモデルでは越波波形、越波の継続時間等も容易に算定でき、実験と比較検討することができる。最後に、このモデルでは越波時の波高と入射波高の比は $(1+K_r)/2$ で与えられることになる。

3. 越波と反射率に関する実験

3.1 実験の概要

越波と反射率の関係を実験的に調べるにあたって、Mizuguchi (1993) のモデルの妥当性を検討するという目的で、室内実験を行った。実験装置としては、中央大学理工学部土木工学科水理実験棟内の幅 80 cm, 長さ約 25 cm の断面水槽において、図-2 に示すように、底上げした一様水深部中 (壁直前の状況が沖方向に続いている場合と考えられる) に高さ 25.5 cm, 厚さ 1.5 cm の鉛直型模型 (耐水ペニヤ製で上端は 45° の鋭角部をもつ) を設置した。入・反射波の測定のために、その前面沖側に 50 cm 間隔で4台の新容量式水位計 (正豊工学製のいわゆる分圧式波高計、以下、水位計とする) を設置し、そのうちの1台のすぐ横に超小型電磁流速計 (アレック電子製 ACM-250, 以下、流速計とする) を底面から水深の $2/3$ の所に設置した。越波波形は、鉛直壁直前に水位計⑤を設置して測定した。越波量については、鉛直壁直後に集水箱を設けその中に水位計を置き電氣的に測定した。

実験条件は以下の通りである。波は規則波で、その周期は 1.32, 1.52 s の2種類、水深を 16.5~24.5 cm の5種類、入射波高を約 1.0~10.0 cm の範囲で変えて合計 75 ケースの実験を行った。実験範囲は相対天端高にして $0.041 \sim 0.545$ である。入射波の条件としては、相対水深 d/gT^2 にして $0.00729 \sim 0.01480$, アーセル数 U_s にして $3.0 \sim 7.21$ の範囲であり、一次のクノイド波理論の適用

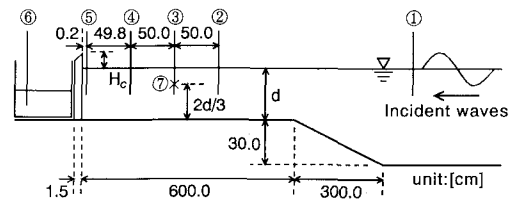


図-2 実験装置と計器の配置図(図中①~⑥は新容量式水位計, ⑦は電磁流速計を表し、底面から水深の $2/3$ の所に設置した。)

はまあ妥当と考えられるところである。また、入・反射波の分離手法として、久保田ら (1989) の疑似非線形理論 (以下、QNL とする) が適当である領域でもある (水口, 1991)。また、現地と比較すれば空間スケールにして、ほぼ $1/100$ 程度の条件になっていると言えよう。

入射波高、反射波高は、同一地点での水位と水平流速の変動 (図中、③と⑦) を測定し、QNL に基づく分離手法を用いて算定した。その他の分離手法についても検討したが QNL によるものが最良の分離結果を与えた。なお、越波量が多い場合は実験の前後で水深が減少するが、原則としてケース毎に水深を元に戻して実験を行った。電氣的なデータの取得は、ノート型パソコン (日本電気製, PC-9801 NA/C) に AD 変換ボード (カノーブス製, ADJS-98) を装備して行った。サンプリング間隔は 100 Hz である。取得したデータはハードディスクに書きこみ、そのままパソコンで解析した。測定は、造波開始直後から、造波板から再反射が返って来るまでの間

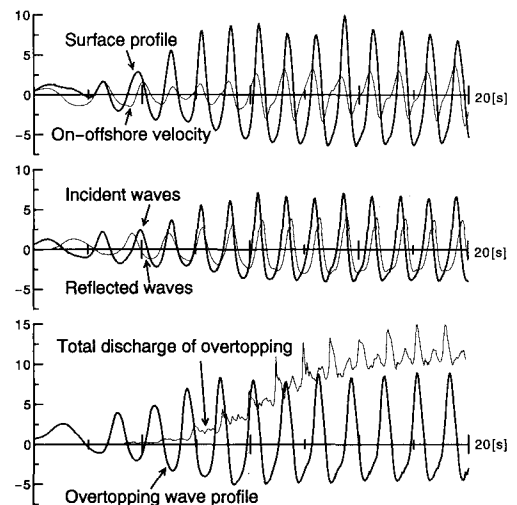


図-3 水面計、流速変動、越波量、越波波形の生データと、分離後の入射波形、反射波形(縦軸の単位は流速については $\times 10$ cm/s, 越波量は cm^2/s , 水位は cm である。横軸は時間である。)

$d=22.5$ cm, $T=1.32$ s, $H_i=10.79$ cm, $K_r=0.650$, $U_s=36.4$, $H_i/d=0.480$, $d/gT^2=0.01317$

(約 40 s 間) に行った。

生データおよび入射波分離の例を図-3 に示す。分離の状況は良好である。あわせて、毎秒 200 コマで撮影した高速ビデオカメラ (NAC 製, HSV-400, 毎秒 400 コマで撮影可能) を用いて越波時の水面計を記録、解析した。越波量の少ない場合の例を図-4 に、多い場合の例を図-5 に示す。越流時の下側の縮流は実験条件の範囲内では無視でき、越流係数を 1 と取ることの妥当性が確認されたと言える。

3.2 実験結果

周期毎に、相対天端高, H_c/d , をパラメータに、入射波高一水深比, H_i/d , を横軸に取って、反射率と無次元越波量をプロットしたものが図-6, 7 である。越波量は入射波波形が波速で進行してくるというイメージのもとに、その何割が越波するかということで、次のような量,

q_i , で無次元化してある。

$$q_i = \frac{H_i}{2} \sqrt{gd} \quad \dots\dots\dots (4)$$

図中の実験は、クノイド波理論を用いた Mizuguchi (1993) モデルによるものである。入射波高が小さい時は越波せず、その時の反射率はほぼ 1 である。水深が小さい場合、非越波時でも反射率が 1 より小さくでているのは、主として底面摩擦のために伝播中に波が減衰するためと考えられる。波高が大きくなると、越波が始まるが、越波の開始は、波の非線形性のために、入射波高 H_i

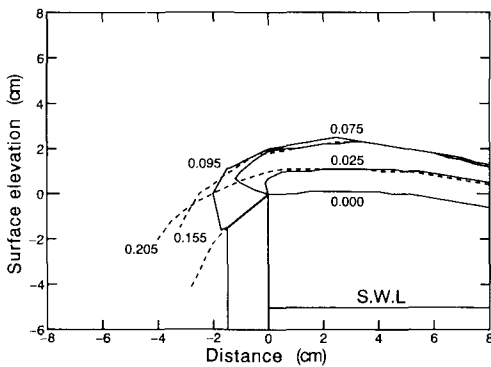


図-4 高速ビデオカメラによる越波時の水面形(図中の数字は、越波開始時刻を 0 とした時の時間(s), 実線は上昇時の、点線は下降時の越波波形である。越波波形の鉛直座標は鉛直壁先端を原点としている。)
 $d=20.5$ cm, $T=1.32$ s, $H_i=6.93$ cm, $K_r=0.844$,
 $U_s=27.9$, $H_i/d=0.338$, $d/gT^2=0.01219$

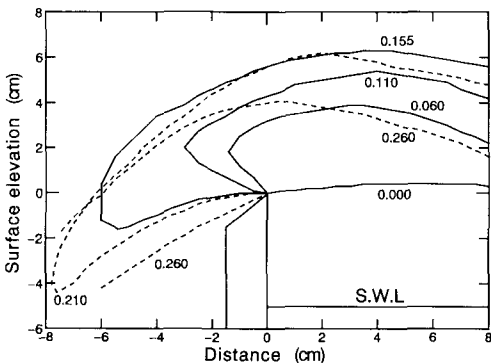


図-5 高速ビデオカメラによる越波時の水面形(図の説明については図-4 を参照。)
 $d=20.5$ cm, $T=1.32$ s, $H_i=11.26$ cm, $K_r=0.662$,
 $U_s=45.0$, $H_i/d=0.549$, $d/gT^2=0.01219$

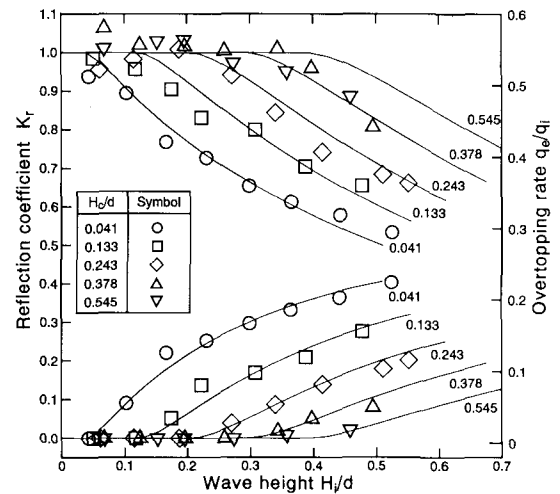


図-6 反射率、越波量と相対入射波高(上方は反射率で左軸の目盛に、下方は越波量で右軸の目盛に対応する。図中の線は Mizuguchi (1993) のクノイド波モデルによるものである。数字は天端高水深比を表す。周期は 1.32 s である。)

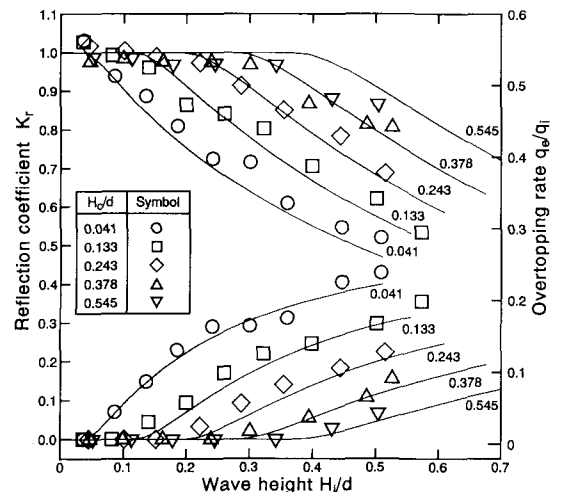


図-7 反射率、越波量と相対入射波高(図の説明については図-6 を参照。周期は 1.52 s である。)

が天端高よりやや小さいところで観測されている。さらに波高が大きくなるに従い越波量が増大し、あわせて反射率は低下していく。相対天端高が高いほど、越波の開始が相対的に早く、越波量の増加、反射率の低下の度合いが大きい。この天端高の違いによる差も波の非線形性の効果を非常によく表している。モデルの検証という観点からは、実験範囲内では、全般的に見て、クノイド波理論を用いたものと実験値の一致は定量的に見ても非常に満足すべきものである。

図-8, 9 は、やはり周期ごとに越波の継続時間について調べたものである。実験における継続時間の算定は、

鉛直壁直前の水位形データを用いて行った。縦軸には、一周中に越波時間の占める割合 T_e/T を取っている。その割合は、越波開始直後は、波高増大にともない急激に大きくなるものの、その後は頭打ち、さらには天端高が低い場合には波高の増大にもかかわらず継続時間が減少するという傾向があらわれる。これも波浪の非線形性のなせるわざで、非線形性が強くなるに従い、波形が細ってくるためである。そしてこの場合の実験値とモデルの計算結果（図中の実線）の一致は驚くほどである。

ついで、越波の時間波形についての検討であるが、ここでは越波時の最高水位 $\eta_{e,max}$ について調べた。その結

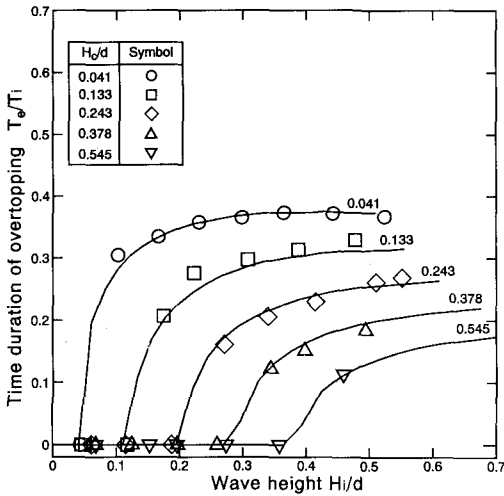


図-8 越波継続時間と相対入射波高（図中の線は Mizuguchi (1993) のクノイド波モデルによるものである。数字は天端高水深比を表す。周期は 1.32 s である。）

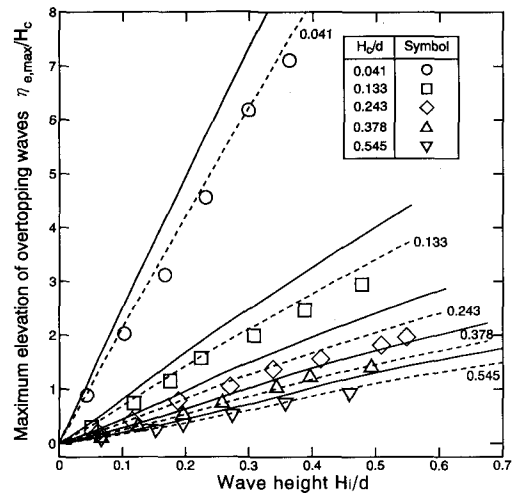


図-10 最大越波波高と相対入射波高（図中の実線は Mizuguchi (1993) のクノイド波モデルによるもの、破線はそれに 0.85 を乗じたもの。周期は 1.32 s である。）

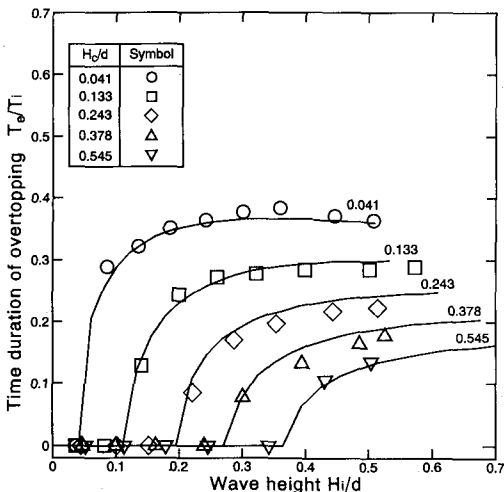


図-9 越波継続時間と相対入射波高（図の説明については図-8を参照。周期は 1.52 s である。）

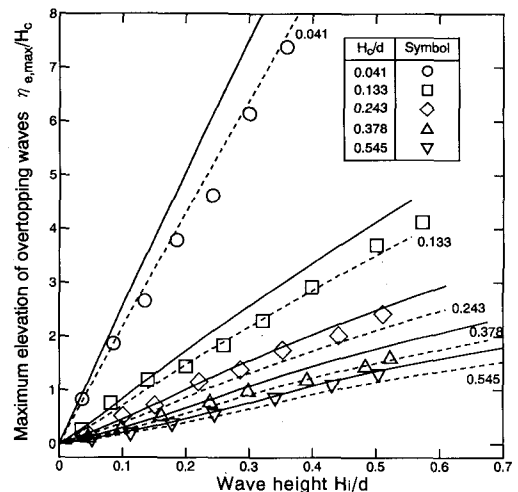


図-11 最大越波波高と相対入射波高（図の説明については図-10を参照。周期は 1.52 s である。）

果を図-10, 11に示す。縦軸には、モデルとの比較が見易いということで天端高との比を取った。図中の実験値は全体的にモデルの値(図中の実績)より小さくでている。そこで、モデルでは、鉛直壁上で最大越波水位を得るようになっているが、高速ビデオカメラによる越波波形を見ると(図-4, 5参照)鉛直壁前面で最大水位が見られる。また、水理公式集(1963)によると堰の越流形状においては、鉛直壁上の水位は接近流速の大きさにかかわらず、上流水位の最大値の85%になるとある。これより、モデルの結果に0.85を乗じて補正をしたものも示してある(図中の点線)。実験値とモデルを補正した計算結果の一致は良好である。

この結果と、図-3中の実測波形の形状(峰にして5-7番目付近)、図-8, 9の越波の経過時間の結果と合わせて考えれば、越波波形をクノイド波としての入・反射波の線形和で与えるのは良い近似と言えよう。

4. おわりに

浅海域に設置された鉛直壁の越波現象について、反射率と越波量の関係に着目して実験を行った。その結果、両者の間に密接な関連のあることが示された。また、両者の有機的な関連を論じたMizuguchi(1993)のモデルの有効性についても検討した。越波量、反射率、越波経過時間、越波波形いずれにおいてもクノイド波理論を用いた場合のモデルの算定結果と実験値は良い一致を示し、モデルの妥当性が確認された。すなわち、入射波、

越波、反射波は式(2)のようにエネルギー的に関連付けられることおよび越波時の波形はクノイド波としての入・反射波の線形的な重ね合わせで表すことが出来ると言えよう。すなわち、式(1), (2), (3)を用いることにより、鉛直壁直前での与えられた条件に対して越波量および反射率を算定することが出来る。

本研究は文部省科学研究費(重点領域, 03201138, 代表: 服部昌太郎 中大教授)の援助を受けたものである。

参考文献

- 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫(1967): 海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1), 第14回海岸工学講演会講演集, pp. 118-122.
- 木村 晃・瀬山 明・山田敏彦(1981): 不規則波の短時間越波量の確率統計, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 335-338.
- 久保田進・水口 優・堀田新太郎・竹沢三雄(1989): 現地遡上域における反射波の特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 120-124.
- 土屋義人・山口正隆(1970): 越波のある場合の重複波の特性について, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 79-84.
- 土木学会編(1963): 水理公式集, 昭和38年度改訂版, pp. 168-169, 603 p.
- 水口 優(1991): 浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 31-35.
- Isobe, M. (1985): Calculation and application of first-order cnoidal wave theory, Coastal Eng., Elsevier, Vol. 9, pp. 309-325.
- Mizuguchi, M. (1993): Wave overtopping rate over a vertical wall and reflection coefficient, CEJ, JSCE, Vol. 36, No. 1, pp. 37-47.