

不規則波による越波

田中浩生*・水口 優**

1. 緒 言

海岸工学において、越波量の算定は重要な問題の一つである。一般に、越波量の算定は模型実験によるか、越波量算定図表（合田，1975）を用いるが、模型実験は特定形状の構造物を対象としている為に、模型形状が異なる場合にはその成果を適用できない。また越波量算定図表は簡便であるものの、これも特定形状の構造物についてのものである。

過去の研究において、理論的な越波量の算定も幾つか行われており、例えば木村ら（1981）は、波高と周期の結合確率分布（二次元ワイブル分布を仮定）を越波量分布に変換することを試みている。しかしながら、変換に用いている越波量算定式（吉川ら，1967）に実験係数が入っている事や、個々の波を規則波とみなす事の妥当性が検証されていない、等の問題点がある。そこで、本研究は実験係数に依ることのない、規則波による越波量算定モデル（Mizuguchi, 1993）を不規則波の個々の波へ適用し、その適用性を実験によって検討するとともに、不規則波による越波量算定の一手法を提案する。

2. 不規則波による越波量算定手法の概要

手法のポイントは、入射する不規則波の個々の波をそれぞれ、等価な波高と周期を持った規則波とみなすことである。越波量算定について具体的にどうするのかは、本研究で行った越波量算定の手順を述べる事とする。

越波量算定の手順は、(I)（実験により）得られた不規則波を入・反射波に分離し、(II) 入射波においてゼロダウンクロス法により一波、一波を定義し、(III) さらに定義された個々の波を、それぞれ等価な波高と周期をもつ規則波に置き換え、それらに対して Mizuguchi (1993) のモデルを適用することにより越波量を算定する、という流れになっている（図-1 参照）。

なお、本研究では浅海域を対象としているので、入・反射波の分離手法には疑似非線形長波理論に基づくもの（久保田ら，1989）を用い、Mizuguchi のモデルについ

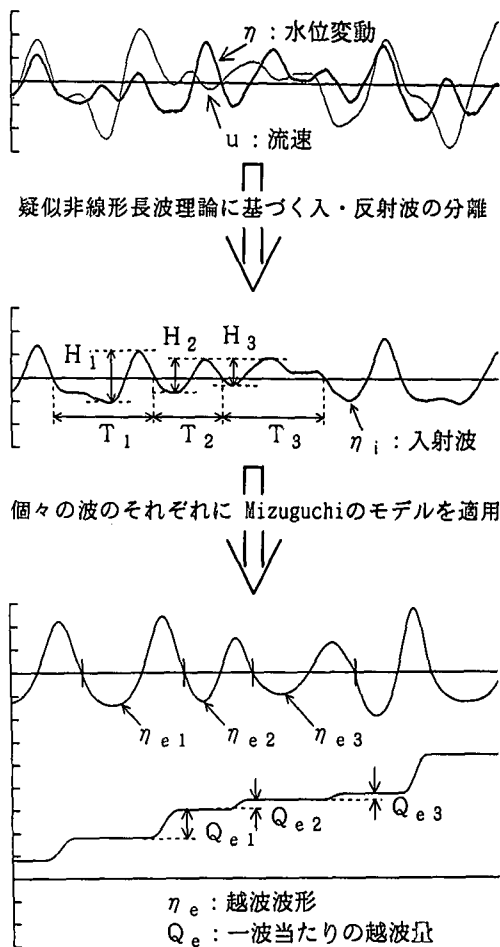


図-1 越波量算定の手法概要図

ては、波動理論として一次のクノイド波理論を用いたものを採用した。

入・反射波の分離手法及び Mizuguchi のモデルについての詳細は、参考文献を参照されたい。

3. 越波と反射率に関する実験の概要と実験条件

2章で述べた手法の妥当性を検討する為、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

* 正会員 工修 日本テトラポッド(株) (前 中央大学大学院)

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

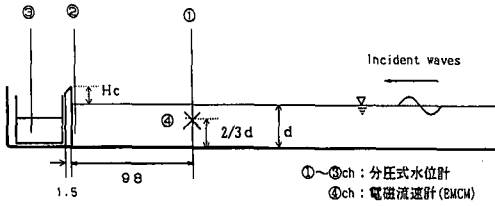


図-2 実験装置 (単位は cm)

理実験棟の外にある、片側にピストン型造波機を有する長さ 30 m、幅 30 cm、高さ 50 cm の二次元水槽を使用した。水槽の床は、ほぼ様な水平床である。図-2 に示す様に造波機と反対側の水槽端部に高さ 25.7 cm、厚さ 1.5 cm の鉛直壁（合板製で、上端は 45 度の鋭角部を持つ）を設置した。

入・反射波の測定のために、鉛直壁前面から沖側に 98 cm の位置に水位計 1 本と電磁流速計 1 本の一組を設置した。越波波形は、鉛直壁直前に水位計を一本置いて測定した。越波量については、鉛直壁背後に集水箱（寸法：25×25×20 cm³）を設け、その中に水位計 1 本を置いて集水箱内の水位上昇量を測定し、それを換算して求めた。集水箱内には消波マットを入れて、越波時に集水箱の水面が極力乱れないようにした。また、実験中に風等の影響を受けないように計器の設置位置付近を除いて水槽上部に蓋をした。

実験は、まず規則波により行った。この理由は、規則波による越波の実験結果が不規則波による越波の実験結果の評価基準となる為である。規則波の実験条件は表-1に、不規則波の実験条件は表-2に示す。不規則波の造波信号は、Bretschneider-光易型スペクトルの標準型を用いて、エネルギー等分割法によりパソコンで作成（成分波数は50成分、各成分波の初期位相はパソコンの乱数を使用）し、これをDA変換して造波機に出力した。

各計器からの計測データはパソコンでAD変換し、デジタル記録した。サンプリング周波数は100 Hzである。データ取得時間は、規則波については50 sで、不規則波については60 sである。解析に用いたデータの部分は、規則波の場合、現象が定常になってから造波板で再反射した波が帰ってくるまでの5波を対象とした。不規則波の場合は、ゼロダウクロス法（もしくはゼロアップクロス法）により定義されたはじめの21波（時間にして、約32～37秒間）を解析の対象とした。尚、今回の実験において、鉛直壁前面で反射した波が、造波板で再反射して再び鉛直壁前面に帰ってくるまでにかかる時間は約40秒である。

図-3 に、生データと入・反射分離した結果の例を示す。上から、流速と水位変動の生データ、入・反射波、

表-1 規則波実験条件 (各データ取得時間 50 s)

実験ケース	d (cm)	H_c/d	T (s)	H_i (cm)
SA1-1~13	24.5	0.049	1.36	2.0~8.0, 0.5(cm)刻み
SBI-1~13	22.5	0.142	1.36	2.0~8.0, 0.5(cm)刻み
SC1-1~13	20.5	0.253	1.36	2.0~8.0, 0.5(cm)刻み
SA1-1~13	24.5	0.049	1.59	2.0~8.0, 0.5(cm)刻み
SB2-1~13	22.5	0.142	1.59	2.0~8.0, 0.5(cm)刻み
SC2-1~13	20.5	0.253	1.59	2.0~8.0, 0.5(cm)刻み

表-2 不規則波実験条件表 (各データ取得時間 60 s)

実験ケース	d (cm)	H_c/d	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)
A1-1~6	24.5	0.049	1.50	2.0, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0
B1-1~6	22.5	0.142	1.50	2.0, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0
C1-1~6	20.5	0.253	1.50	2.0, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0
A2-1~6	24.5	0.049	1.75	2.0, 3.0, 3.2, 3.5, 3.7, 3.9
B2-1~6	22.5	0.142	1.75	2.0, 3.0, 3.2, 3.5, 3.7, 3.9
C2-1~6	20.5	0.253	1.75	2.0, 3.0, 3.2, 3.5, 3.7, 3.9

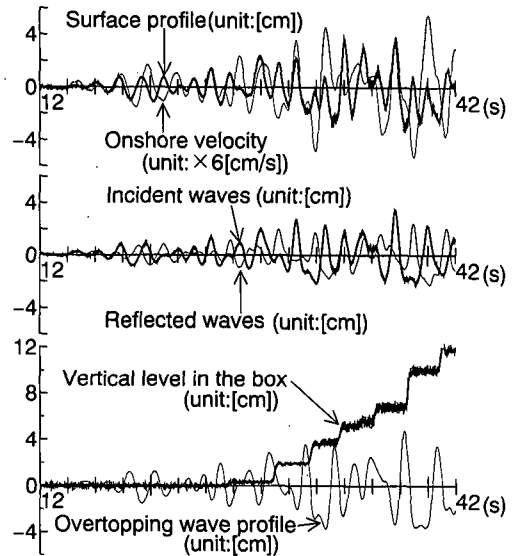


図-3 水面形、流速変動、越流量、集水箱内の水位変動の生データと、分離後の入射波形、反射波形(各量の単位は、各図の縦軸に対して図中に示してある)

$$H_{1/3}=3.7 \text{ cm}, T_{1/3}=1.75\text{s}, d=24.5 \text{ cm}, H_c/d \approx 0.049$$

鉛直壁直前での水位変動と集水箱内の水位変動である。図—3を見ると、きれいに入・反射波に分離されているのがわかる。なお、集水箱内の水位変動の乱れは電気的なノイズによるものである。

4. 実験結果及び考察

4.1 規則波による越波

図-4 は周期 1.59 s の規則波についての実験結果をプロットしたものである。図中の実線はモデルによる結果である。横軸は相対入射波高 H_i/d で、縦軸は左が反射率 K_r 、右が無次元越波量である。越波量については、一波当たりの越波量 $Q_e \text{ cm}^2$ を、入射波波形が長波の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、 $Q_i = H_i T (gd)^{1/2} / 2$ で無次元化してある。

図-4 を見ると、越波量の増大に伴い反射率が減少するという傾向をおおむね表している。しかしながら、反射率・越波量ともに、実験値とモデルにより求められた値（以下、規則波、不規則波を問わずに、モデルを用いて求めた諸量を理論値と呼ぶ）とに若干ずれが生じている。このずれがどの程度であるかを見るために、横軸に理論値を、縦軸に実験値をとってプロットしたのが図-5 である（但し、現象が定常になる前に集水箱が一杯になったケースは除いてある）。

図-5a, 図-5b がそれぞれ反射率、無次元越波量についてのものである。図-5 中の直線は最小 2 乗法によるものであり、併せて相関係数 R も図中に示してある。反射率・無次元越波量のどちらについても、実験値は理論値の 7 割程度になっている。 R は反射率の方が悪いことから、その原因として、(I) 入・反射波分離用計器の設置位置が悪かった、(II) 造波水槽の底面が一様でなかった、等のことによる入・反射分離への影響が考えられる。また、外的要因として風の影響もありえるが、明確な回答は得られていない。

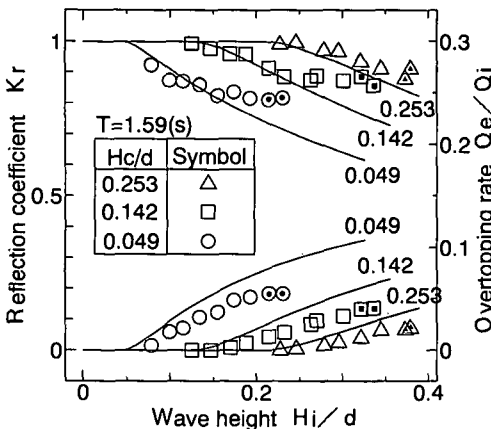


図-4 反射率、越波量と相対入射波高
図中の黒印のついた点は、現象が定常になる前に集水箱が一杯になったケースである。

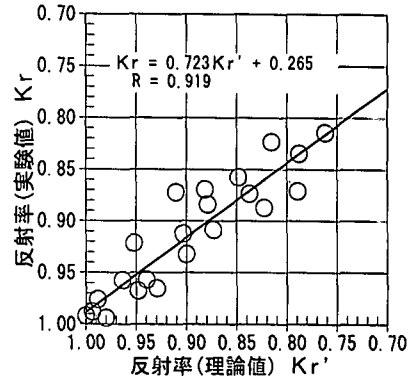


図-5a 反射率の理論値と実験値との比較

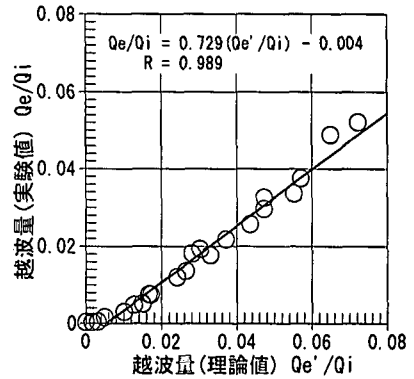


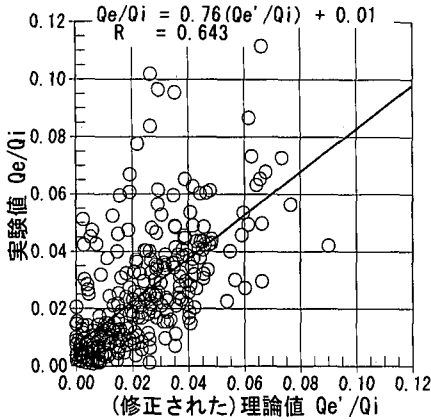
図-5b 越波量の理論値と実験値との比較

4.2 不規則波による越波

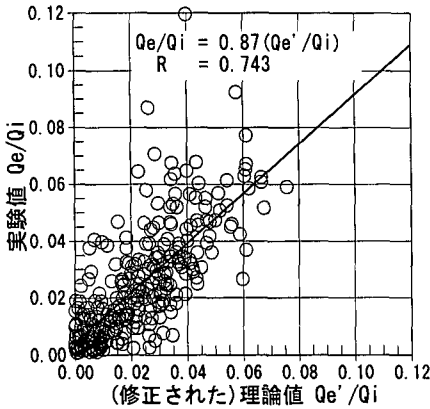
図-6 の各図は、越波量の理論値 Q_e' と実験値 Q_e をそれぞれ Q_i で無次元化して、プロットしたものである。プロットは、全実験ケース（総波数 756 波）中の越波した波（756 波中の 285 波）を対象とし、理論値は規則波の実験結果、図-5b を参照して、 $Q_e/Q_i = 0.729 \cdot (Q_e'/Q_i)$ のように補正した。図-6 の各図中の直線は最小 2 乗法によるものであり、併せて R をのせてある。図-6a は、個々の波の定義にゼロアップクロス法を用いており、図-6b はゼロダウンクロス法を用いている。最小 2 乗法による直線と R を見ると、ゼロダウンクロス法を用いる方がゼロアップクロス法を用いるより良い結果を示している。しかしながら、規則波の結果（図-5b 参照）と比べると、不規則波の方が明らかに点のばらつきが大きい。この事は、(I) 波形の不規則性、(II) 個々の波の平均水位の変動、に起因する。

(II) が実験結果へ及ぼす影響を消去するため、ゼロダウンクロス法により定義された個々の波のそれぞれに対し、水深を次のように補正した。

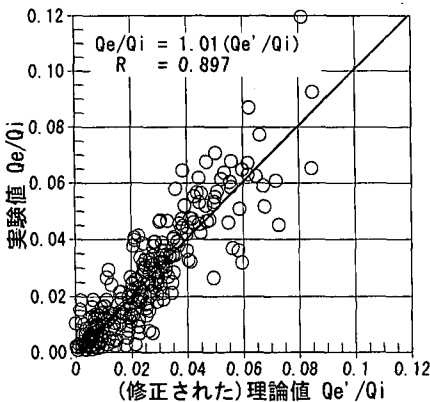
定義された個々の波のうち、ある任意の一波の水位変動の平均が s とすれば、この波についての水深は $d' = d$



図—6a 越波量の理論値と実験値との比較
全実験ケース (総波数 756 波) 中の越波した波 285 波 (ゼロアップクロス法)



図—6b 越波量の理論値と実験値との比較
(ゼロダウンクロス法)

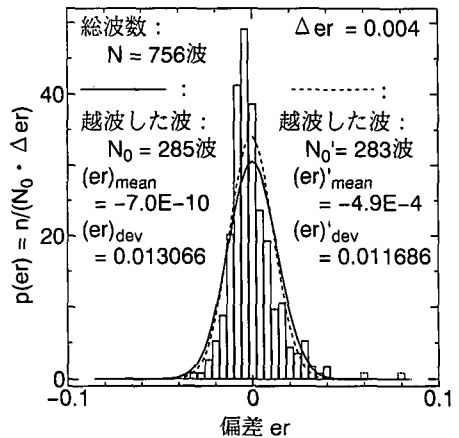


図—6c 越波量の理論値と実験値との比較
(ゼロダウンクロス法+平均水位の補正)

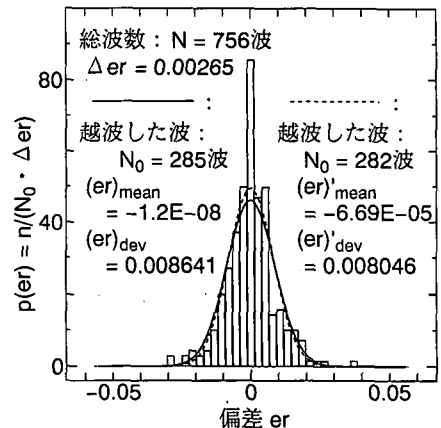
+sと補正される。図—6cの横軸は、この補正された d' 用いて計算した越波量 Q_e を Q_i で無次元化したものである。この図も、図—6a, bと同様に最小2乗法による直線と相関係数 R をのせている。個々の波の平均水位を考慮することにより、プロットした点のばらつきが小さくなったのがわかる。また、最小2乗法による直線の傾きはほぼ1に等しい。従って、平均的に見れば規則波の結果 (図—5b 参照) と一致するといえる。

次に、図—6b, cについてそれぞれ、図中の各点と最小2乗法による直線との鉛直距離、偏差 e_r の分布を図—7a, bに示す。縦軸は確率密度 $p(e_r)$ で、図中の曲線は正規分布である。この曲線を描くに当たり、偏差の標本平均 $(e_r)_{\text{mean}}$ と、分散の推定値 $(e_r)_{\text{var}}$ から求めた標準偏差 $(e_r)_{\text{dev}}$ 用いた。各値は図に示してある。

図—7a, bをみると、どちらについても偏差分布は正規分布より急峻な形状である。また、0を含む e_r の階級区



図—7a 偏差分布 (図—6b 参照)



図—7b 偏差分布 (図—6c 参照)

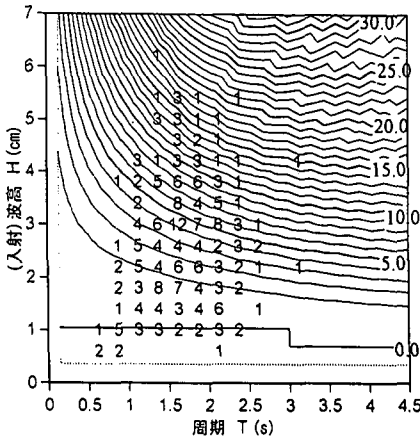


図-8a 波高と周期の結合度数分布と等越波量線
図中の曲線は等越波量線、単位は (cm^2) である。
整数は、個々の波の度数である。対象は $H_c/d=0.049$
のケースの全ての波で、総波数 252 波である。

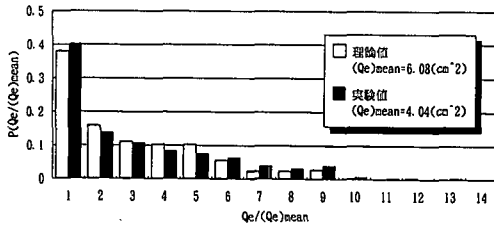


図-8b 越波量分布

間に対する $p(e_r)$ は、分布のピークになる事が通常予想されるが、図-7a はそうになっておらず、ピークに対する e_r の階級区間は若干左にずれている。図-7b の結果も併せれば、平均水位の変動による影響と考えられる。

5. 越波量分布

ここまでは、決定論的に議論してきた。最後に、実験から得られた波高と周期の結合度数分布と、一次のクノイド波理論を用いた Mizuguchi のモデルにより計算された等越波量線を組み合わせて求めた越波量分布を示す。

個々の波の定義はゼロダウクロス法を用い、平均水位の変動は考慮していない。また、実験条件は $H_c/d=0.049$ である(総波数 252 波)。図-8a が、波高と周期の結合頻度分布と等越波量線である。図-8b が越波量分布であり、実験から直接得られた越波量分布も併せて載せ

てある。図-8b の横軸は、越波量 Q_e を平均値 $(Q_e)_{\text{mean}}$ で割って無次元化しており、理論値に対しては理論値のものを、実験値に対しては実験値のものをを用いた。理論と実験の分布は良く一致している。しかしながら、越波量の平均値について見れば、規則波の実験結果(図-5b 参照)と同様に、やはり実験値は理論値の 7 割程度になっている。

6. 結 論

個々の波を等価な波高と周期を持つ規則波に置き換える事の妥当性を検討するとともに、不規則波による越波量算定の一般的な手法の開発を試みた。

今回の実験において、「実験値が理論値の 7 割程度になる」という問題は未解決のままである。しかしながらこれは規則波についてだけでなく、不規則波についても同様であった。このことから、不規則波による結果を規則波による結果で補正し、手法の妥当性を検討した。

個々の波の定義については、ゼロアップクロス法よりもゼロダウクロス法を用いる方が良い。ゼロダウクロス法による場合、さらに、個々の波の平均水位まで考慮すれば、平均的には規則波の結果とほぼ完全に一致する。但し、波形の不規則性により、若干の分散もある。また、平均値からの偏差の分布は、正規分布より急峻な形状を持つ。この偏差の分布形状についての議論はされていない。これは、今後の課題といえる。

越波量分布については、規則波についての結果を考慮すれば、理論と実験は良く一致しており、今後、理論的な波高と周期の結合確率分布が導かれれば、直ちに越波量分布も導かれるであろう。

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 回海岸工学講演会論文集, 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特性, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 335-338.
- 久保田進・水口 俊・堀田新太郎・竹沢三雄 (1989): 現地観測における反射波の特性, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 120-124.
- 横山 健・水口 俊 (1993): 鉛直壁における越波量と反射率について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 120-124.
- Mizuguchi, M. (1993): Wave overtopping rate over a vertical wall and reflection coefficient, CEJ, JSCE, Vol. 36, No. 1, pp. 37-47.