

逆流上の不規則波の浅水変形に関する研究

堀 茂樹* ・ 太田和彦**・ 大場宏樹***
栗林俊展****・ 佐伯 浩*****

1. 緒 言

流れの存在する浅海域に於ける不規則波の変形特性を解明することは、例えば河口付近での漂砂現象を論ずる場合に重要となる。流れの影響のない不規則波の変形や流れの影響を受ける規則波の変形に関する研究は数多く行われているが、流れの影響と波の不規則性の両者を考慮した研究は少ない。

流れのない場合の不規則波の変形に関して、合田¹⁾、菅原・山本²⁾は深海域での波高分布をレーリー分布とした浅水変形モデルを、また水口・松田³⁾、岩垣・間瀬・田中⁴⁾は波別解析法によるモデルを提案している。いずれのモデルに於いても砕波前の浅水変形の計算には首藤⁵⁾の非線形長波理論あるいはそれを修正したものを用いており、砕波限界波高及び砕波後の波高変化には各々独自の計算式が用いられている。これらの計算式は本来規則波に対するものであるから、逆流の影響を受ける規則波の変形計算式が導かれれば、波別解析法を用いた不規則波の変形計算が可能となる。

本研究では、斜面上の逆流を進行する不規則波の変形に関する実験を行い、変形特性に及ぼす逆流の影響を明らかにする。次に、逆流の影響を受ける規則波の実験結果に基づく波別解析法による変形計算モデルを提案し、計算値と実験値との比較によりその適用性を検討する。

2. 不規則波の実験

(1) 実験装置および方法

実験に用いた不規則波造波水路は長さ 35 m、幅 80 cm、深さ 120 cm であり、その概略を図-1に示す。造波板の前面に設けられた取水口より真空ポンプによって水路岸側端に設置したタンクに水を送り、逆流を発生させた。また、大きな流量が必要な場合は造波板の後面に水中ポンプを投入した。タンクより越流した水は 5 m の水平床上で整流され、勾配 1/30、長さ 18 m の斜面上

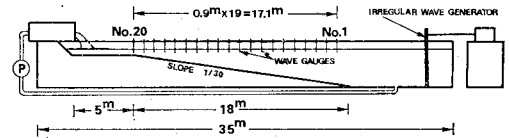


図-1 実験装置

を逆流として流れる。水平床上の水深は 11.2 cm とした。

水面波形は容量式波高計を用い、図中の No. 1～No. 20 の 20 地点で計測した。各測点での水面記録をゼロアップクロス法により個々の波に分解し、平均波、有義波、1/10 最大波の波高と周期を計算する。解析を行う記録長は約 200 秒としたので、計算に用いられる波数は平均周期によって異なる。

発生波は 5 種類の不規則波であり、逆流の流量を変化させて計 11 case の実験を行った。各 case での諸量を表-1に示す。なお、表中の H'_0 、 T'_0 は深海域での代表的な波高、周期を示すもので、以下のように定義される。No. 1 (最も水深の大きい測点) でのゼロアップクロス波から 4. で述べる波別解析法によって深海域での波高分布を推定し、その有義波の波高及び周期を H'_0 、 T'_0 とする。

表-1 実験諸量

Case	q ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)	H'_0 (cm)	T'_0 (s)	H'_0/L_0	q^*
A-0	0	6.4	0.97	0.043	0
A-1	38.1	6.6	0.96	0.046	4.53×10^{-5}
A-2	81.3	6.5	0.96	0.045	9.63×10^{-5}
A-3	161.3	6.5	0.96	0.045	1.88×10^{-4}
A-4	335.0	6.5	0.97	0.044	3.77×10^{-4}
B	162.5	9.5	1.03	0.057	1.55×10^{-4}
C	75.0	5.5	0.79	0.057	1.60×10^{-4}
D-0	0	13.6	1.47	0.040	0
D-1	143.8	13.6	1.46	0.041	4.80×10^{-5}
D-2	311.9	13.4	1.41	0.044	1.17×10^{-4}
E	142.5	4.4	1.34	0.016	6.13×10^{-5}

(1) 実験結果

Case A-0～A-4 は不規則波信号を同一として逆流の流量だけを変化させた実験であるので、これらを比較すると変形に及ぼす逆流の影響をみることができる。図-

* 正会員 工修 岩手大学助手 工学部土木工学科

** 西松建設(株)

*** 仙建工業(株)

**** 日本電信電話(株)

***** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

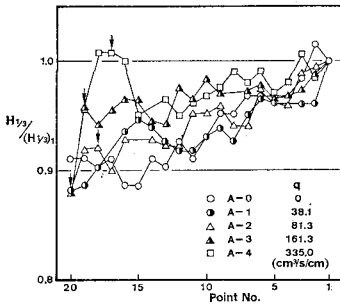


図-2 有義波高の変化

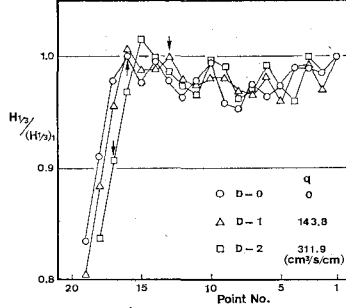


図-3 有義波高の変化

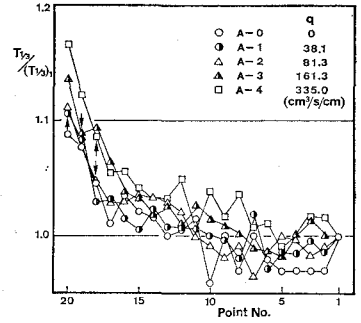


図-4 有義周期の変化

2 は各測点での有義波高と No. 1 での有義波高との比 $H_{1/3}/(H_{1/3})_1$ の変化を示したものであり、横軸は測点番号である。図中の矢印は碎波が頻繁に生じ始める位置を示したもので、目視観測によったため波高の変化から推定される碎波帯との対応が悪い場合もあるが、ほぼ碎波帯の沖側端を示している。流量の少ない場合には、 $H_{1/3}/(H_{1/3})_1$ は水深の減少に伴い減少し、碎波帯内で急激に減少する。流量が多くなると、碎波帯直前で増加している。各水深での値は流量が多くなる程大きくなり、波高変化に及ぼす逆流の影響が現われている。図-3 は D-0~D-2 を比較したものである。碎波帯内での減少する割合は流量に係わりなくほぼ一定であり、また流量が多い程深い水深から減少し始めるため、各水深での値自体は流量が多いもの程小さくなっている。このように、逆流は不規則波の波高変化に影響を及ぼし、碎波帯以深では逆流が大きい程、また碎波帯内では小さい程有義波高は大きくなることがわかる。このような傾向は規則波の波高変化に及ぼす逆流の効果と全く同一である。

図-4 では各測点での有義周期と No. 1 での有義周期の比 $T_{1/3}/(T_{1/3})_1$ の変化を比較してある。有義周期は水深の減少に伴い増大し、碎波帯に近づくとも増大する割合も大きくなる。また、全体的に逆流が大きい場合の方が大きな値を有する。平均周期の変化も有義周期と同様な傾向であり、No. 20 では 10~20% 大きくなっており、これは波の数が減少したことを意味している。水口・松田²⁾は碎波帯では波の進行に伴う 2 次波峰もしくは副次的な波の発生により波の数が增加することを指摘しているが、本実験での水深の範囲 (最も浅い測点で 11.2 cm) では碎波帯内でも波の数は減少する。

合田¹⁾は深海域での波高分布がレーリー分布である不規則波の波高変化の推定法を提案している。図-5 で、○●は逆流のない場合の実験結果であり、実線は合田の推定法で $H_0/L_0=0.04$ とした場合の計算値である。図に示した実験では、深海域での波高分布はレーリー分布に比べ平均値より若干大きい値でピークを有する分布であった。しかし、実験結果と計算値はかなりよく一致し

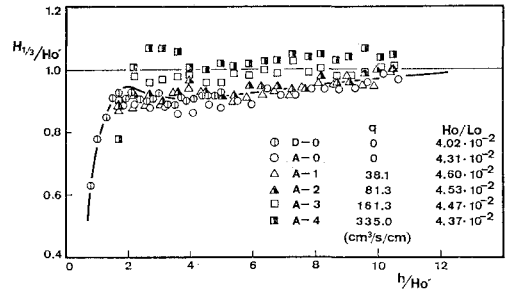


図-5 合田の推定法による計算値との比較

ており、波高分布がレーリー分布と多少異なっているが、合田の推定法は妥当な近似的を与えている。図中の他の実験結果の中で流量の大きい場合は流れのないものと比べかなり異なった傾向を示しており、逆流の影響を考慮しなければならないことを示している。

3. 浅水変形モデル

(1) 碎波前の浅水変形

逆流の無い場合の変形モデルでは、浅水変形の計算式として首藤⁵⁾の非線形長波理論による実用式が用いられている。流れの影響を受ける場合の浅水変形の計算では非線形性を考慮に入れたものとしてはエネルギーフラックス法によるストークス波の変形が計算されているが、首藤の式に対応するような実用式は得られていない。そこで、本論では線形理論を用いる。

一様な逆流を伴う波の線形解では、水深が変化してもエネルギーフラックスが一定であるとする次のような関係が得られる。

$$E(C_{gr}-U)=E_0C_{g0}=\text{const.} \quad (1)$$

ただし、

$$E=\frac{1}{8}\rho g H^2, \quad C_{gr}=C_r \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

C_{gr} : 水に対する相対的な群速度, C_r : 水に対する相対的な波速, U : 逆流の流速, k : 波数, h : 水深, 添字 0 は深海での値を示す。

波が水深の浅い領域に進行すると radiation stress によ

る wave set down が生じ、平均水面が低下する。また、流れが存在する場合、流量が一定であれば水深によって平均流速が変化し、これに応じて水面勾配が生じる。流れによる平均水面の低下と wave set down の両者とも水深の浅い所程顕著となる。浅水変形の計算では一般に wave set down の効果は考慮されておらず、実際のその量も無視し得る程度のものである。しかし、流れの流速変化による水面勾配は流量によっては無視し得ない場合もあり、考慮される必要がある。両者による平均水面の変化を考慮した場合のエネルギーフラックス $\bar{W}$ は次式で計算される(ただし、 ϕ にはベルヌーイの式に於ける時間に関する任意関数は含まれない)。

$$\bar{W} = \int_{-h}^{\zeta} \phi_t \cdot \phi_x dz \quad \dots\dots\dots (2)$$

ϕ, ζ に線形解を代入し、 $\bar{W}$ を一定とすると

$$E(C_{gr} - U) \left(1 - \frac{U}{C_r}\right) = E_0 C_{g0} = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、式(1)とは異なった解が得られる。 $\omega = 2\pi/T$ として次のような無次元化を行う。

$$h^* = h\omega^2/g, \quad U^* = U\omega/g, \quad k^* = k\omega^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

沖波波高を H_0 、水深 h での波高を H とし、式(4)を式(3)に代入すると、

$$\frac{H}{H_0} = \left\{ \frac{1 + k^* U^*}{(1/k^* + U^*)(1 + 2k^* h^* \text{cosech}(2k^* h^*)) - 2U^*} \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。なお、式(1)による H/H_0 は式(5)の分子を1とした形となる。図-6, 7 は各々式(1)、式(3)による計算結果と実験値とを比較したものである。この実験条件のように $H_0/L_0, q^*$ (無次元単位幅流量、 $q/g^2 T^3$) とも大きい場合には、式(1)は碎波点近傍での変化は表現できず、式(3)による計算値は実験値と極めて良く一致している。一方、 $H_0/L_0, q^*$ とも小さい場合は、実験値に対し式(1)は若干小さく、逆に式(3)は若干大きくなり、両式は実験値の下限と上限を示す。 H_0/L_0 と q^* によって式(3)の妥当性は異なるが、全般的に式(1)に比べ式(3)の方がよい近似を示す。本論では浅水変形の計算式として式(5)を用いる。

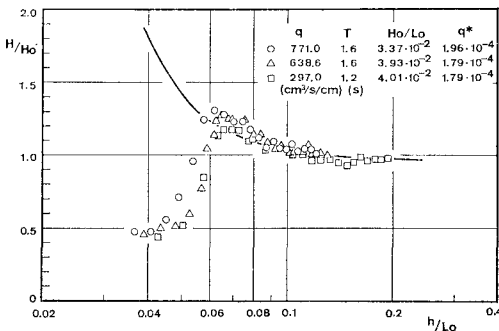


図-6 式(1)による計算値と実験値との比較

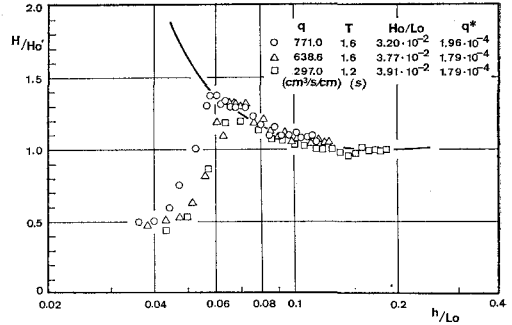


図-7 式(3)による計算値と実験値との比較

(2) 碎波限界波高

斜面上の逆流を進行する規則波の碎波限界式として、碎波時の水深、波高、波長の関係は

$$\left(\frac{H}{L}\right)b = \alpha \cdot \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)b \quad \dots\dots\dots (6)$$

となり、 α は q^* によって決定される⁶⁾。式(6)は碎波点での水深、波高、波長を測定して求められた実験式であるから、前章で述べた線形理論によって計算される波高、波長が式(6)を満足したとしても、その水深は実験での碎波水深と必ずしも一致しない。そこで、線形理論による波高、波長と水深の関係で決定される碎波点と規則波の実験での碎波点とが最も良く一致するような α を求めると、文献6)で示した α の1.2倍の値が最適であることがわかった。本論では q^* から求まる α の1.2倍の値を用い、線形理論による波高、波長が式(6)を満足した時に碎波が生じるとして計算を行った。

(3) 碎波後の波高変化

著者ら⁷⁾は碎波後の波高変化に関する Battjes⁸⁾のモデルを基に、逆流の影響を考慮した計算式を導いた。水底勾配 1/50 での実験値と比較すると、計算式は妥当な近似を示している。しかし、水底勾配が 1/50 より急になると碎波点直後の減衰が過大に見積られ、近似の精度は低くなる。また、この計算式では $(H_0/h_0)(h_0/gT^2)^{1/2}$ と $U_0/\sqrt{gh_0}$ とがパラメーターになっており、これらは実験結果の傾向をよく説明しているが、これらによる傾向

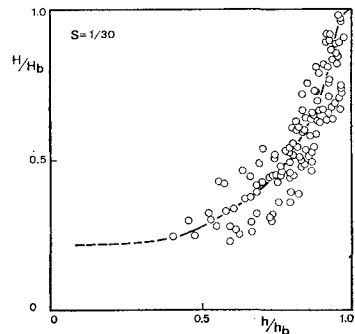


図-8 碎波後の波高変化

の違いは水底勾配の影響に比べると小さい。図-8 は水底勾配 1/30 の波高変化の実験結果を示したものであり、全体的な傾向は実線で示す近似曲線で表わされる。本論ではこの近似曲線を基に碎波後の波高を推定する。ただし、 $h/h_0 < 0.4$ のデータがないため、碎線のように仮定した。実際の計算では $h/h_0 < 0.4$ になる波は少なく、有義波等にはあまり影響していない。

(4) 規則波の計算結果

上記の計算式及び近似曲線を用い、規則波の変形計算を行い、実験値との比較を行う。計算では碎波点の位置をできるだけ正確に見積る必要があるため、水深を 2 mm ずつ変化させた。図-9 はその一例である。波形勾配が小さい場合には、3. (1) で述べたように碎波前の浅水変形の計算値は若干大きい。碎波後も大きな値を示す。波形勾配が大きい場合には碎波点の前後ともかなりよく一致している。他の実験値との比較も含めて、本計算モデルは規則波の変形に対しては妥当な近似を示していると言える。

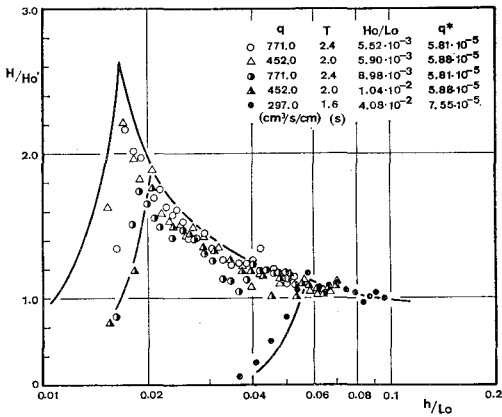
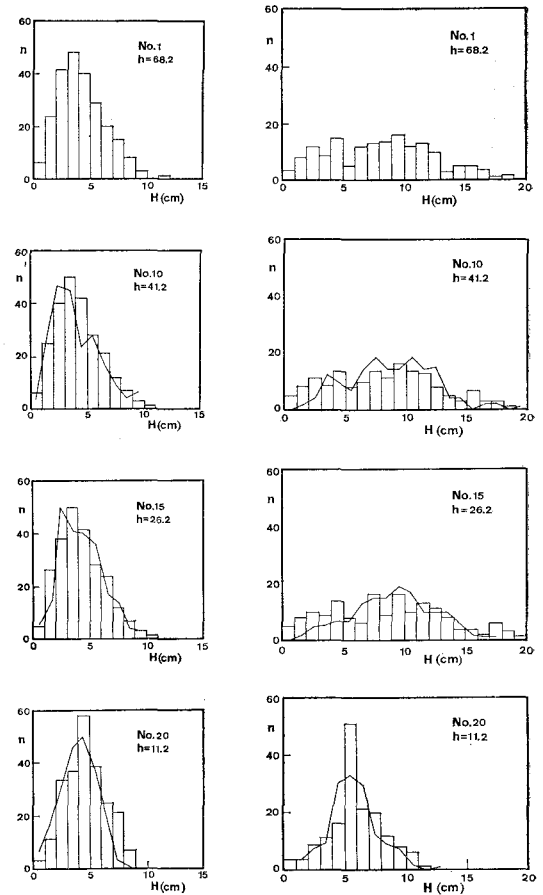


図-9 規則波の計算結果と実験値との比較

4. 不規則波の浅水変形計算

No. 1 で計測された水面波形からゼロアップクロス法によって個々の波を定義し、それらに対し 3. で述べた浅水変形モデルを適用して、その後の波高分布を推定する。計算結果と実験値とを比較したものの代表的な例を図-10 に示す。Case A-3 の No. 1 での波高分布は最上段の図に示すようなものであり、この分布をもとにした計算値は波の進行に伴う波高分布の変化をほぼよく近似しているようである。Case D-1 の No. 1 での波高は比較的広い範囲に分布しており、このような場合には Case A-3 に比べ近似の精度が低く、特に碎波帯内をかなり進行した位置 (No. 20) では平均値付近の波の数を過大に見積っている。しかし、全般的には実験値にほぼ対応しているといえる。

次に、平均波高、有義波高、1/10 最大波高の変化の



(a) Case A-3

(b) Case D-1

図-10 波高分布の変化 (折線は実験値、棒グラフは計算値)

実験値と計算値の比較を行う。図-11 はいくつかの例を示したものであり、横軸は測点番号である。Case E では、No. 20 が碎波帯の沖側端であったが、このような碎波帯以深ではいづれの代表波高の変化も極めて良く一致している。Case D-0 (本計算で最も近似が良くなった例) と D-2 では、平均波高の変化は Case E と同様良く一致しているが、有義波高、1/10 最大波高では碎波帯に近づくにつれ若干過大に計算されている。しかし、波高が最大となる位置など全体的傾向を比較的良好に表わしており、妥当な近似を与えているといえる。他の実験での比較も含めて、有義波高は碎波帯以深で最大 10%、碎波帯内で最大 20%、有義周期は全体を通して最大 10% 以下の誤差の範囲で実験値を近似している。

5. 結 語

逆流の影響を受ける不規則波の浅水変形に関し、実験及び変形モデルによる計算を行ったが、本論での主要な結論を要約すると以下のようになる。

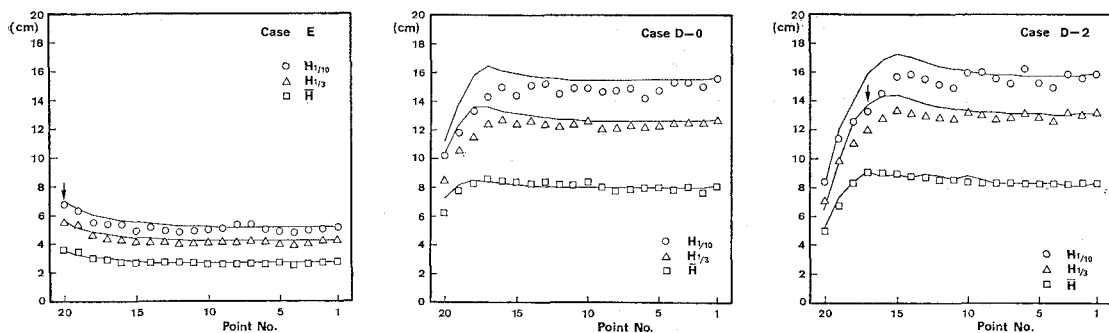


図-11 代表波の変化の実験値と計算値の比較 (○ △ □ は実験値, 実線は計算値)

- 1) 有義波の波高及び周期は逆流の影響を受け、碎波帯以深では流量の大きい程波高は大きく、周期は長くなる。碎波帯内では流量の大きい程波高は小さい。
- 2) 碎波前の浅水変形の計算式としては、平均水面の変化を考慮した式(5)が全体的によい近似を与える。
- 3) 不規則波の浅水変形モデルによる計算値は有義波高の変化などをよく近似している。

なお、非線形性を考慮した浅水変形計算式や碎波後の変化の定式化などに関し今後検討を加え、変形モデルの改良を行いたいと考えている。

最後に、本研究に際し北海道電力技術研究所の方々には大変お世話になり、また岩手大学工学部土木工学科笹本誠技官と大学院生冷水康悦君の多大な協力を得たことを記し、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，pp. 59~106, 1975.
- 2) 菅原輝男・山本正昭：波の浅水変形計算モデル，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 80~84, 1978.
- 3) 水口 優・松田伸次：現地不規則波の浅海変形について，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 134~138, 1980.
- 4) 岩垣雄一・間瀬 肇・田中 剛：不規則波の浅海変形モデルについて，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 104~108, 1981.
- 5) 首藤伸夫：非線形長波の変形——水路幅、水深の変化する場合，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 57~63, 1974.
- 6) 堺 茂樹・佐伯 浩・尾崎 晃：一様流を伴う有限振幅波理論の適用性，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 64~68, 1983.
- 7) 冷水康悦・堺 茂樹：碎波後の波の波高変化に及ぼす逆流の影響，第40回年講，1985.
- 8) Battjes, J. A.: Energy dissipation in breaking solitary and periodic waves, Manus. Delft Univ. of Tech., 1978.