

不規則波の碎波変形に関する実験的研究

磯部 雅彦*・西村 仁嗣**・柄 登志彦***

1. 序 論

碎波帯内に生じる海浜流、漂砂、拡散といった現象の解明に際して、外力として作用する波動の場を正確に把握することは極めて重要である。しかしながら碎波変形の難解さと現地波浪の不規則性のために、そのとり扱いは困難な状況にある。

不規則波を有義波等の代表波で表現し、微小振幅波理論に基づいて各種の計算を行なう方法は最も簡便な考え方として広く用いられて来たが、特に波浪のエネルギーあるいは radiation stress 等の評価に際して、その不十分さが指摘されている。こうして提案されたさらに詳細なとり扱いの一例が波別解析法である。ここでは不規則波を個々の波に分割し、それぞれについて対応する規則波と平行して議論がなされる¹⁾。Battjes²⁾、合田³⁾および樫木ら⁴⁾は碎波帯内における波高の頻度分布の場所的变化を考え、波毎に微小振幅波理論を適用することによって wave set-up を計算している。波別解析法の基礎となる規則波の碎波変形に関しては、Horikawa and Kuo⁵⁾および水口ら⁶⁾が微小振幅波理論に基づく研究を行っている。

本研究は二次元実験をもとに不規則波群中の個々の波の碎波変形を、規則波との比較において論ずることを目的としている。また屈折計算に際して必要となる波速の表示に関しても検討を加える。

2. 実験方法

幅 80 cm、長さ 26 m の不規則波発生装置付二次元水槽内に 図-1 に示すような一様勾配斜面 (勾配 $i=1/20$ および $1/10$) およびステップ型斜面の合計 3 種の地形断面模型を設定し、それぞれに対して規則波、合成波および不規則波の 3 種の波を作用させてその変形を調べた。規則波の周期は 0.6~1.5 秒、波高は 1~6 cm とした。合成波とは同一周期で波高のみ変化する 2~4 波を繰り返し作用させたものである。また不規則波の造波に際し

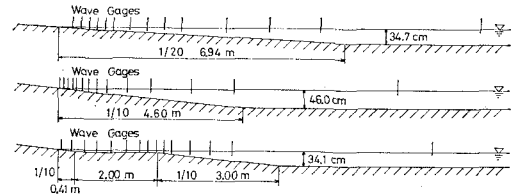


図-1 波高計配置図

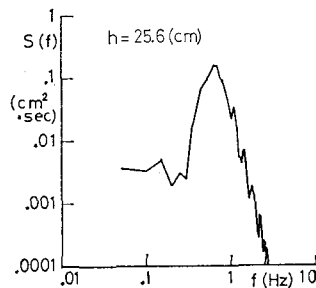


図-2 不規則波のスペクトル密度関数

ては数値フィルターを用いて作成した不規則信号を入力したが、振幅レベルは 3 通りに変化させた。

図-2 に不規則波のスペクトル密度関数の一例を示す。いずれの場合にも水位記録上で平均水位を切る点を基準として個

々の波を定義することになるが、その結果得られるある波の周期は進行とともにいく分変動する。そこで便宜的に波形が比較的安定した領域での平均周期をとって入射波周期とした。

3. 規則波

(1) 波高変化

得られた波形記録の一例を 図-3 に示す。対称な入射波形がしだいに波高を増すとともに前傾し、碎波に至る。碎波点付近では波峯が鋭く尖るため顕著な波高の増大が見られ、碎波後は鋸状の波形となる。

図-4 は水深変化に伴う波高変化の様子を $1/20$ 勾配斜面の実験結果の一部について描いたものである。横軸および縦軸はそれぞれ静水深 h および波高 H を沖波波長 L_0 により無次元化したものとなっている。図中の実線および点線はそれぞれ周期 1.2 秒および 0.8 秒の規則波に関する実験結果である。比較のため $H=\gamma h$ ($\gamma=0.82$) および合田⁷⁾による新碎波指標を破線および一点鎖線で示した。なお、水深としては本来実測された平均

* 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 筑波大学助教授 構造工学系

*** 正会員 大成建設(株)

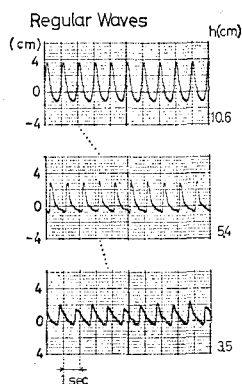


図-3 波形記録(規則波, 1/20 勾配斜面)

水深をとるべきであるが, wave set-up もしくは set-down の量は最も岸側の測定点を除いては水深に比較して無視できる量であり, 便宜的に静水時の水深をとった. ちなみに海底勾配 1/10, 波高最大のケースで最大 1.0 cm の wave set-up が測定されている. また二点鎖線は○印の波についてエネルギーの保存性から求めた理論的な波高変化を示している. この場合微小振幅波理論と有限振幅波理

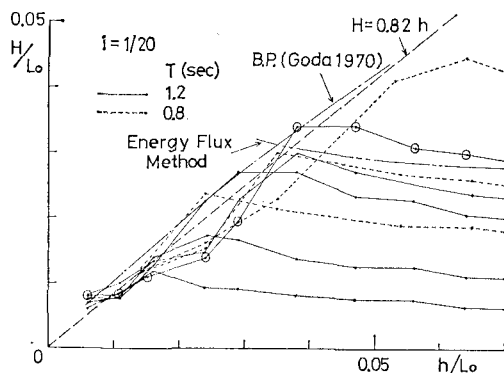


図-4 波高変化(規則波, 1/20 勾配斜面)

論とは有意な差を生じず, いずれも実測された波高増大の状況を説明し得ていない. 1/10 勾配斜面の場合, 1/20 勾配斜面の場合に比して砕波点が岸側に出る傾向が見られるが, これは従来から言われているところである. この場合にも砕波点近傍における波高増大の測定結果はエネルギーフラックス法による計算結果よりも大きくなっている. ただし, ステップ型斜面の場合にはステップ上で波が分裂する場合もあり, 波高変化の状況を単純に議論することはできない.

(2) 波速の変化

砕波帯においては波形が著しく変化するため, 波速の定義そのものが問題となる. このような場合, 従来は波峰又は平均水位を切る点の移動速度として波速を定義する方法が多くとられて来た. しかし, こうした定義に従ってデータ解析を試みた結果, 砕波変形の過程で生じる微細な水位変動が波速の評価に相当程度の影響を及ぼすことがわかった. したがってここでは波形のフーリエ解析を行ない, その第1項に相当する基本波形の移動速度をもって波速を定義した. 図-5は図-4で○印を付した波(換算沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.029$)の条件に対応する規則波中の5波について水深変化に伴う波速の変

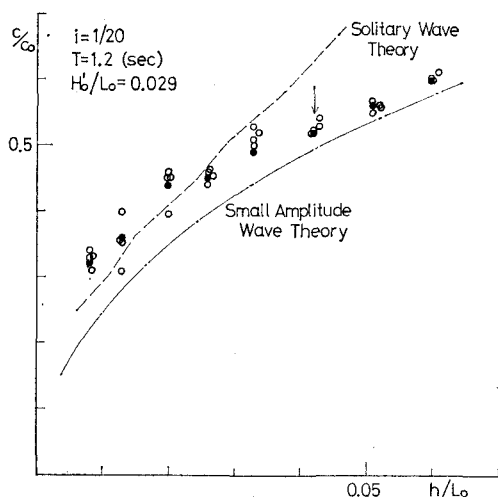


図-5 波速の変化(規則波, 1/20 勾配斜面)

化を描いたものである. 図の横軸は図-4におけると同様に相対水深 h/L_0 であり, 縦軸は対応する深海波の理論波速を用いて無次元化した実測波速 c/c_0 である. 同図中には微小振幅波理論に基づいて計算された波速が実線で示されている. また, 破線は実測された波峰の高さに対応する孤立波の波速 $\sqrt{g(h+\eta_0)}$ を示している. ここに g は重力加速度, η_0 は静水面から測った波峰の高さである. 砕波以前の領域では実測波速と微小振幅波理論による波速との一致は良好であるが, 砕波後の領域ではむしろ孤立波理論との符合が認められる⁸⁾.

(4) エネルギー変化

線形理論によれば, 波動のエネルギーは水位変動の自乗平均で与えられる. しかしながら, 砕波帯内で実際に内部流速を測定すると, 水面波形から線形理論に基づいて算定された流速よりも若干小さな値を得ることが多い. とくに高周波成分に関してはこの傾向が顕著である. ここでは, 波形をフーリエ級数に展開したとき, その第5項までをとれば原波形の特性が十分に把握され, これから波動エネルギーの主要部分が算定されるという前提に立ってその評価を試みた. 若干のケースについてはさらに高次までの計算を行ない, 残余項の効果が大き

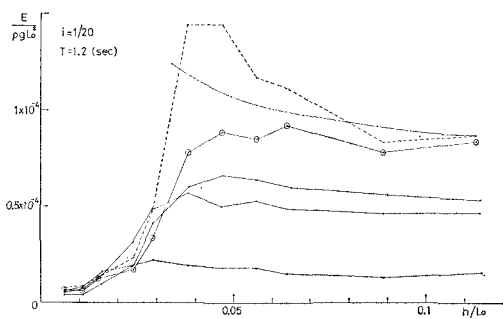


図-6 エネルギー変化(規則波, 1/20 勾配斜面)

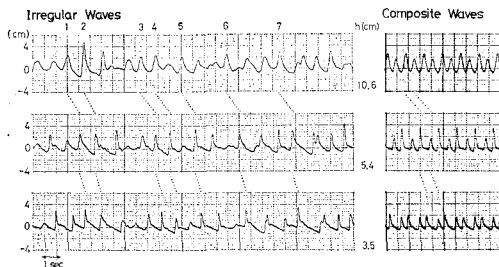
くないことを確認した。図—6 は上記の方法に従って算定した平均的な波動エネルギー E を無次元化したもの ($E/\rho g L_0^3$, ρ は流体の密度, g は重力加速度) の変化を示したものである。実測波形から求めた平均エネルギーが碎波以前よりすでに減少を始めていることは注意すべき点である。同図中の点線はやはり○印の波について実測波高を用い、波形を正弦波と考えた場合の平均エネルギーを示している。これがかなりの過大評価となっていることは明らかであり、碎波点近傍におけるその変化の傾向についても妥当な説明を与えていない。同じく、一点鎖線は微小振幅波理論によって波の浅水変形を計算し、平均エネルギーの評価を行なったものであるが、この結果に関しても類似の結論が導かれる。

4. 不規則波および合成波の碎波変形

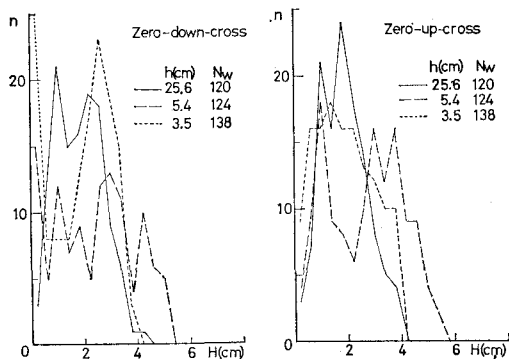
(1) 波の定義法

図—7 は不規則波および合成波の波形変化の測定例である。不規則波においても個々の波は徐々に前傾して碎波に至る。

不規則波群中の個々の波をとり出してその変形を論じる場合、まず不規則な水位変動をどのように区切って一波一波を定義するかという基本的な問題に直面する。通常の zero-up-cross 法によれば波の背面が完全に包含される形で単位波が定義されることになる。しかしながら、少なくとも碎波変形に関する限り、波の前面の特性が1次的な要因となることはデータ解析の結果からも明ら



図—7 波形記録 (不規則波・合成波, 1/20 勾配斜面)



図—8 波高の頻度分布の変化 (1/20 勾配斜面)

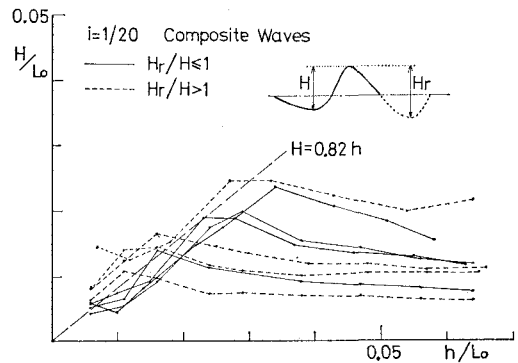
かである。

図—8 は3地点における水位記録から, zero-down-cross 法, および zero-up-cross 法によってそれぞれ波高の頻度分布を求めたものである。両者を比較すると特に碎波帯内では小波高側の分布形態が大きく異なっている。碎波によって波の背面のなだらかな水面勾配上に生じた細かい波動が静水面を切るとき, 前者においてはこれを新たに生じた小波動として数えるが, 後者によれば一波であった波を二分することになる。これが波高の頻度分布の差異となって現われるわけで, zero-down-cross 法に従い, 微小波動を無視して波の総数 N_w から差し引くならば, ステップ型斜面を除いて各地点における波の数は1割のばらつきの範囲におさまる, 個々の波に対応づけることが比較的容易となる。

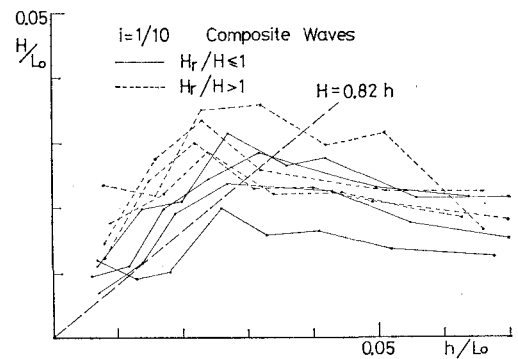
以上の考察に基づき, 本節では zero-down-cross 法による波の分離を行なうこととする⁹⁾。

(2) 波高変化

図—9 および 図—10 は合成波の波高変化を示すものである。実線は波の後側の trough が波の前面のそれより高い, すなわち図中の記号で $H_r/H < 1$ となるような波の変形を示し, 点線は逆に $H_r/H > 1$ なる波の変形状況を示している。図から明らかなように波の後側の trough が低い場合には相対的に碎波が遅れる。図—11



図—9 波高変化 (合成波, 1/20 勾配斜面)



図—10 波高変化 (合成波, 1/10 勾配斜面)

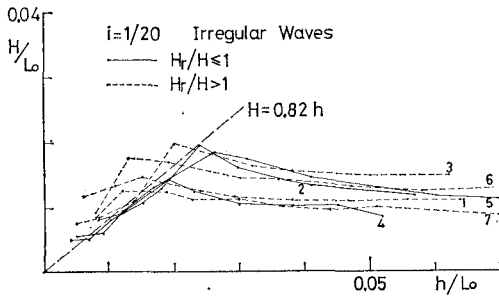


図-11 波高変化(不規則波, 1/20 勾配斜面)

は全く同様に不規則波の波高変化を示したものである。ここでも上述の傾向は明確に認められる。さらに詳細な検討によれば、ある波の前後の trough の高さがほぼ同じである場合、先行する crest が著しく高ければやはり碎波が遅れている。なお、図-11 でとり上げた波の波群中の位置関係は 図-7 に対応番号で示されている。

これらの図から zero-down-cross 法によって定義した波の波高変化は対応する規則波の波高変化に比してある程度のばらつきを呈するが、これは主として後続の trough の深さによって支配される現象であることがわかる。個々の波の変形は自己の波高のみならず、2 次的には直後の trough の深さ、さらに 3 次的には直前の crest の高さの影響を受ける。このため、図-8 に見られるように波高の上限が多少不明確となる。

(3) 波速の変化

図-12 は不規則波群中の個々の波についてフーリエ解析を行ない、その第 1 項に相当する基本波の位相速度を図示したものである。矢印は波高が最大となる地点を示している。規則波の場合と同様、碎波後の波速は微小

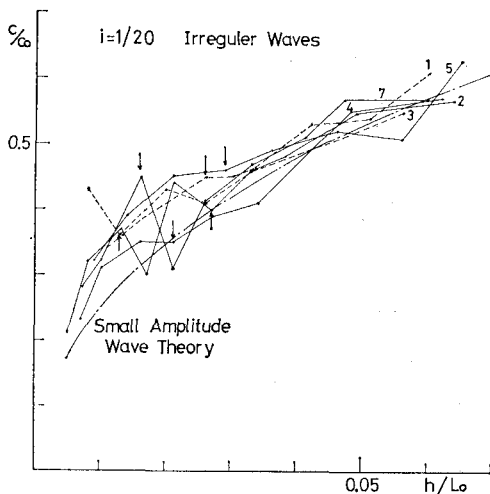


図-12 波速の変化(不規則波, 1/20 勾配斜面)

振幅波理論によって算定された波速よりも大きく、孤立波理論がほぼ妥当な評価を与えている。

5. 結 論

本研究により得られた結論は次の通りである。

- (1) 不規則波群中の個々の波の碎波変形を論じる場合、zero-down-cross 法によって一波一波を定義するのが合理的かつ有効である。
- (2) こうしてとり出された個々の波の波高変化は必ずしも対応する規則波の波高変化と合致しない。着目する波の直後の trough が自己の trough よりも低い場合には碎波がいく分遅れる。
- (3) 個々の波の位相速度は碎波前の領域では微小振幅波理論によってほぼ妥当に与えられるが、碎波後はそれよりも大きく、むしろ孤立波の位相速度に近くなる。
- (4) 実測波形から線形理論を用いて計算した単位水面積当りの平均的な波動エネルギーは、実際には波高が最大となる地点よりも沖側で最大となる。波形を一定と考え、波高の変化を直接的に碎波帯付近の波動エネルギーあるいは radiation stress の変化に結びつけると、これらを過大評価することになる。

本研究は文部省科学研究費補助金(自然災害特別研究「高潮の発生機構とその極値に関する研究」、研究代表者: 京都大学防災研究所 土屋義人教授)を得て行なわれたものである。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・木村 晃・岸田典史: 斜面上における不規則波の碎波に関する研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 102~106, 1977.
- 2) Battjes, J. A.: Set-up due to irregular waves, Proc. 13th Conf. on Coastal Eng., pp. 1993~2004, 1972.
- 3) 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.
- 4) 樫木 享・岩田好一郎・東 俊夫: 不規則波による平均水位変動に関する研究, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 184~188, 1978.
- 5) Horikawa, K. and C. T. Kuo: A study on wave transformation inside surf zone, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., pp. 69~81, 1966.
- 6) 水口 優・辻岡和男・堀川清司: 碎波後の波高変化についての一考察, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 155~159, 1978.
- 7) 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第107号, pp. 39~49, 1970.
- 8) 水口 優: 碎波後の波の屈折と波速に関する研究, 土木学会論文報告集, 第291号, pp. 101~105, 1970.
- 9) 堀田新太郎・水口 優: 碎波帯内の波の現地観測, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 152~156, 1979.