

浅海域における不規則波の波高変化について

木村 晃*・後藤克史**・瀬山 明***

1. はじめに

浅海域における不規則波の碎波変形モデルとしては、Collins¹⁾、Battjes²⁾、郭・郭³⁾、合田⁴⁾らのものがよく知られている。これらのモデルは“ゼロクロス波の力学的特性は同じ波高、周期を持つ規則波とほぼ等しい”ことを前提としており、モデルの中に規則波の Shoaling 特性、碎波条件あるいは碎波後の波高を与える式を含んでいる。各モデルともそれぞれ一定の適合性を持つことが示されているが、碎波・変形の全ての過程で、上述の前提の妥当性について十分系統的な検討を行ってモデルを構築しているものはない。一方、こうした総合的なモデル化の試みとは別に、ゼロクロス法で定義した不規則波の個々の波の力学的特性について検討する研究の流れがあり、そこでも浅海域での波の変形特性に関する研究が行われている。著者ら⁵⁾あるいは磯部ら⁶⁾、榎木ら⁷⁾はゼロアップ（ダウン）クロス波が規則波に比して“碎波しやすい”ことを明かにしており、著者ら⁸⁾はさらに計4000波のゼロダウncross波を用いて検討し、碎波条件の定式化を行っている。本研究はやはりゼロクロス波の力学的特性、特に浅海域での shoaling 特性および碎波後の波高変化について検討したもので、それぞれについて定式化を試みた。

2. 実験ならびに解析方法

実験に用いた水槽は長さ29m、幅50cm、深さ75cmの両面ガラス張り水槽である。この水槽の一端には電気油圧式不規則波発生機が設置してある。他端には一様勾配のスロープを設置して実験を行った。スロープの勾配は1/10、1/20、1/30および1/50の4通りを用いた。（緩勾配スロープの先端部は一部若干急な勾配のスロープを接続した。）スロープ上には一定間隔で波高計を設置し、水面変動を測定するとともに、水槽側面からはビデオカメラで水面変動を撮影した。実験に用いた不規則波は Pierson-Moskowitz 型のもので、ピーク周波数が0.7 Hz

あるいは0.8 Hzのものを用いた。実験は①shoalingに関する実験と②碎波後の波高変化に関する実験に分けて行った。実験結果の解析は①ではビデオカメラの映像をもとに碎波点を決定し、それより沖側の波高計の記録を用いて波高の変化特性を検討した。また②でも①と同じ方法によったが、碎波点の位置および碎波高はビデオ画像から読み取った。表-1に実験波の諸元を示した水深45cmの一樣水深部に設置した波高計で測定したもの。

表-1 実験波の諸元

slope	f_p (Hz)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)
1/10	0.7	10.8	1.37
1/20	0.8	12.9	1.21
1/30	0.8	8.8	1.15
1/50	0.8	7.4	1.17

3. 不規則波の Shoaling 特性

波高計は目視観測による碎波点より沖側に設置した。波高計の設置水深を表-2に示す。解析にあたり、波の峰から水粒子が飛び出す瞬間を碎波と定義し、ビデオ画像から碎波点を決定した。次に碎波点より沖側の波高計の記録を解析しゼロダウncross法で波を定義した。図-1は浅水係数の実測値の1例を示したもので、1/10のスロープを用いた場合の結果である。図の縦軸の H_0' および横軸の L_0 はそれぞれ表-2の最も沖側の波高計で測定した波高・周期から計算した換算碎波波高および波長である。また d は以前著者ら⁹⁾が提案した補正水深（波高中分点から水底までの距離）である。図中の実線は微小振幅波理論の浅水係数を与える式である。各ケースとも約1000波のデータを解析したが、データ数が多く煩雑であるのでここでは平均値を用いて検討を行う。図-2(a), (b) および (c) はそれぞれ波形勾配が (a) 0.02, (b) 0.04, および (c) 0.06 の波の浅水係数の平均値を示すものである。各図とも図中の○印は斜面勾配が1/10, ⊙は1/20, ●は1/30, ●は1/50のスロープ上での shoaling 特性を示したものである。ただし、各データとも図に示した波形勾配の値から ± 0.005 の範囲に入るもの

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部海洋土木工学科

** 正会員 工修 株式会社大本組

*** 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部海洋土木工学科

表-2 波高計の設置水深

勾配 波高計	1/10	1/20	1/30	1/50
1	44.0	33.8	23.8	17.2
2	38.2	29.0	20.8	15.5
3	31.8	24.6	18.5	13.6
4	25.2	21.0	16.0	12.2
5	18.4	17.6	13.2	10.5

を含んでいる。各点とも100点あるいは50点の実測値の平均であり、データの平均位置にプロットしてある。データの縦棒はデータの標準偏差の大きさを示す。図中の実線は微小振幅波、1点鎖線は首藤の理論による浅水係数、点線は著者ら⁸⁾による不規則波（ゼロダウン波）の碎波限界を与える式である。碎波限界式は斜面勾配によりわずかに変化するのでここでは1/30の場合のものが示してある。著者らの式はよい限界となっており、斜面勾配にかかわらずこれより岸側にプロットされるデータは非常に少ない。各スロープとも波形勾配の小さな(a)図の場合データは理論より幾分大きく、(b)、(c)と波形勾配が大きくなるにつれて次第に下にプロットされる傾向が見られる。しかしその差はわずかであり、ここで示したデータの範囲では浅水係数に及ばず波形勾配の影響は小さく、図中に示した理論値との差の最大値は理論の10%程度である。特にデータの主要部が分布する沖波波形勾配が0.04の場合、斜面勾配にかかわらずデータと理論との対応は良好である。つぎに Shoaling 特性に及ぼす波の非線形性の効果について検討する。非線形理論として用いた首藤の理論は $gHT^2/d^2=30$ で微小振幅波理論から分岐する形をとっている。図からわかるように上述した分岐点の位置は波形勾配の減少にともなう d/L_0 の小さな方に移動する。一方、点線で示した碎波限界も波形勾配の減少とともに次第にその傾きが大きくなり、点線と線形および非線形両理論との交点もやはり d/L_0 の小さな方に移動する。分岐点と交点の間隔は波形勾配が0.06の場合にはほぼ無視できるものの波形勾配の減少にともなうわずかに増加する傾向を示す。しかし波形勾配の減少にともなう増加の割合は小さく、各スロープとも波は Shoaling における非線形性の効果が顕著になる以前に碎波する。合田ら⁹⁾によれば十分発達した風波の有義波の波形勾配は0.03~0.04程度であり、ここで用いた波の波形勾配もほぼ同じ特性を持っていることから、十分発達した風波の Shoaling 特性は微小振幅波理論で十分近似することができる。さらに近似的にはこの範囲の波に対しては shoaling による波高変化は無視 ($K_s=1.0$) しても誤差は小さい。しかし、波形勾配が小さくなるほど碎波限界(点線)と両理論

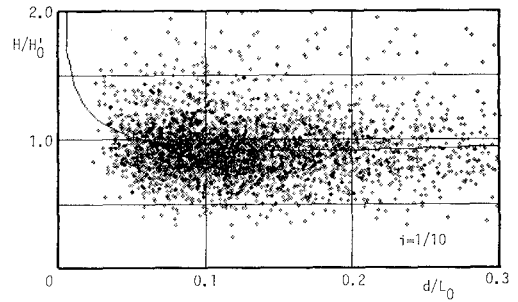
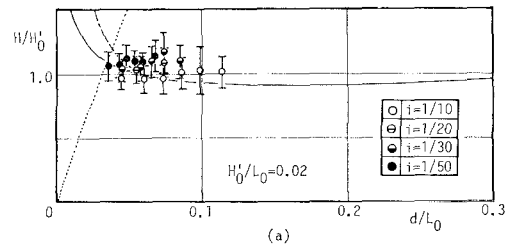
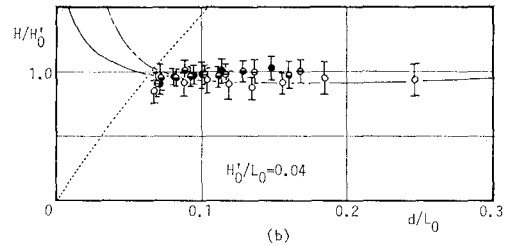


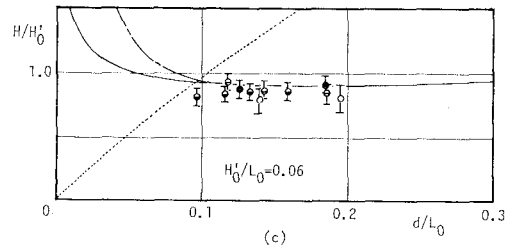
図-1 ゼロダウンクロス波の浅水係数の実測値



(a)



(b)



(c)

図-2 ゼロダウンクロス波の浅水係数の平均値

式との交点と分岐点との距離が大きくなる傾向がある。したがって、波形勾配の主要部が0.01あるいはそれ以下の範囲に分布する(減衰距離の長いうねり性の)不規則波では(相対水深の非常に小さな領域に限られるが)非線形性が無視できなくなることが予想される。ただし、この領域でのゼロクロス波の Shoaling 特性を与える式については別途検討が必要である。

つぎに図-1に示されるデータのばらつきについて検討する。前述したように換算沖波波高は一番沖側の波高計で測定した値を用いて計算してある。ゼロクロス波の場合、水深減少に伴う波高の変化は浅水変形ばかりでな

く速度分散によるものも無視できない。ここでは速度分散によるばらつきを分離推定するために各スロープ別に次のような検討を行った。(1) 表-2の中の2本の波高計のすべての組合せを作る。(2) 各組合せ毎に岸側の波高計で測定した波高 H を沖側の波高計の位置での波高を用いて計算した換算沖波高 H_0' で割って、岸側の波高計の位置での浅水係数を計算する。(3) 沖側の波高計で測定した波の周期をもとに波を 0.1 s ごとのランクに分ける。(4) 各ランクごとに H/H_0' の平均値と標準偏差を計算する。(5) 波高計の組合せごとに、両者の中間点での波長 L_m をランクごとに計算する。図-3は(4)の標準偏差の値を示したもので、横軸は波高計の組合せごとの波高計間隔 l を L_m で割った値である。図からわかるようにデータは幾分ばらつくものの斜面勾配による差は少なく、いずれも l/L_m の増加にともないほぼ直線的に大きくなる。データに対する回帰式(直線)は次式のようになる。

$$\sigma(H/H_0') = 0.1(l/L_m) + 0.1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

速度分散による誤差の標準偏差が(1)式の右辺第1項で与えられるとすると、ゼロダウンクロス法で浅水特性を検討する際、不可避免的に入り込む誤差の標準偏差は第2項で与えられる。

4. 砕波後の波高変化

実験に用いた不規則波ならびにスロープは3.で用いたものと同じである。波高計は各ケースとも砕波帯の若干沖側から水深2~3 cmまでの間に12本設置した(1/10は6本)。砕波点ならびにそこでの水深 d_b 、波高 H_b 、周期 T はビデオ画面から読み取った。波の定義はすべてゼロダウンクロス法によった。水深は前述の補正水深を用いた。図-4は砕波後の波高変化の1例を示したもので1/20斜面での結果である。各ケースとも約1000波のデータを解析したがデータ数が多く煩雑であるので区間ごとの平均値を用いて論議する。図-5は1/30のケースで d/d_b の0.1きざみの範囲内での H/H_b および d/d_b の平均値を示したものである。図から波高は砕波後も僅かの間増大し、最大値に達した後減衰を始めることがわかる。これは砕波の定義によるもので、本来 plunging point に達するまでは実質的なエネルギー減衰は起こらず、砕波後もしばらくは波高が増大する。波高が最大になる点を砕波点とする研究も多いが、この点を特定することは困難であり、その点での波の性状も明かでない。

最高点に達した後、波高は減衰を始める。しかし図からもわかるように、減衰の傾向は一様でなく、 $d/d_b = 0.6$ 付近から岸側の波高減衰の割合がそれより沖側のものに比してやや緩やかになっている。観測によると、この付近がほぼ Bore 出現点となっており、これより岸側と沖

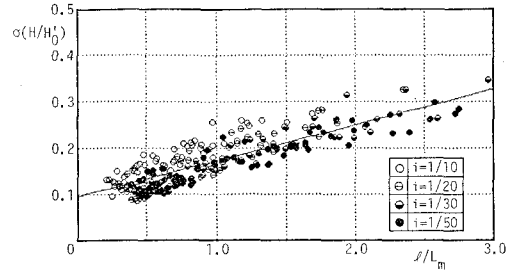


図-3 浅水係数のばらつきの標準偏差

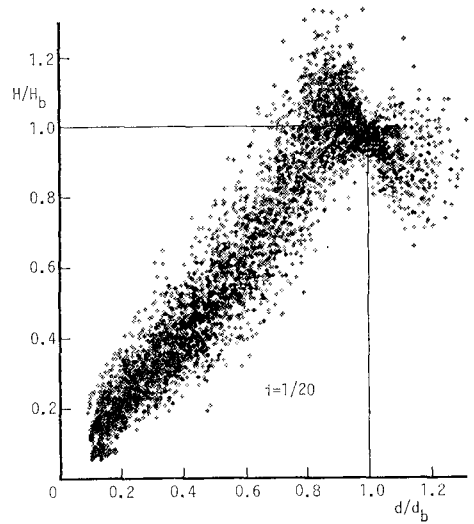


図-4 ゼロダウンクロス波の砕波後の波高変化

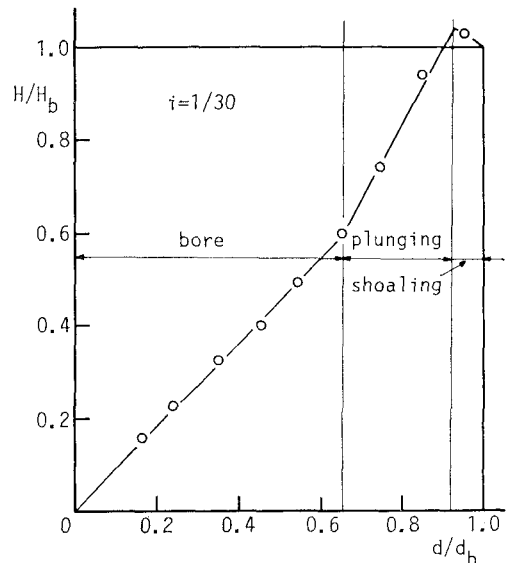


図-5 砕波後のゼロダウンクロス波の波高の平均値の変化

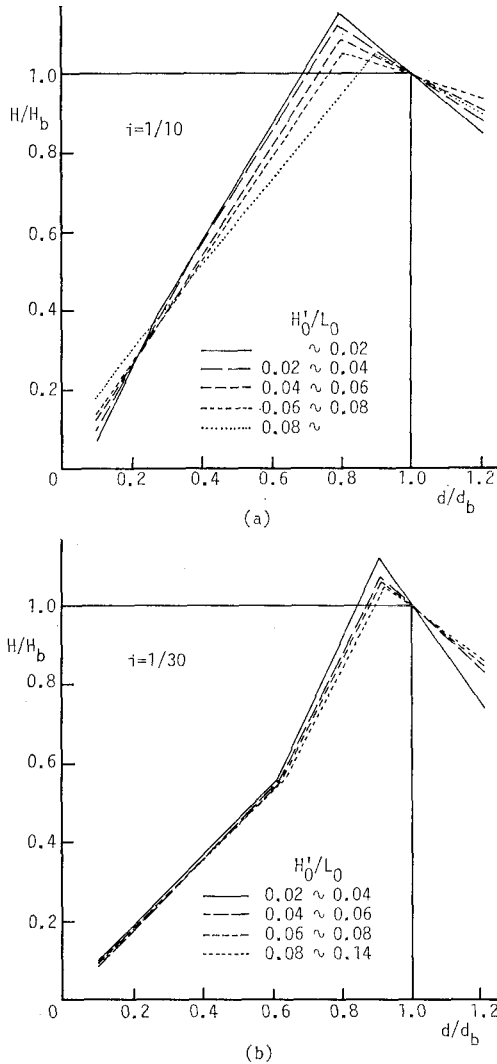


図-6 砕波後の波高変化への波形勾配の影響

側では波の性状が異なる。そこでこの研究では砕波点より岸側を3つの領域に分けて検討を行った。すなわち砕波点から波高が最大となる点まで、この点から減衰特性が緩やかになる点まで、およびそれより岸側の3領域でありそれぞれ Shoaling 領域、Plunging 領域および Bore 領域とした。斜面勾配が緩やかになるにつれて Shoaling 領域が狭くなり、1/50 程度になるとほぼ消滅するなどの傾向はみられるが、斜面勾配にかかわらず3つの領域ともデータはほぼ直線的に変化する。本研究では各領域ごとにデータに対する回帰式を直線で与えた。まず波高変化に対する波形勾配の影響について検討した結果を示したものが図-6で、波形勾配ごとに区分したデータに対する回帰式を示したものであり、(a)は1/10、(b)が1/30斜面でのものである。図から波形勾配の増加

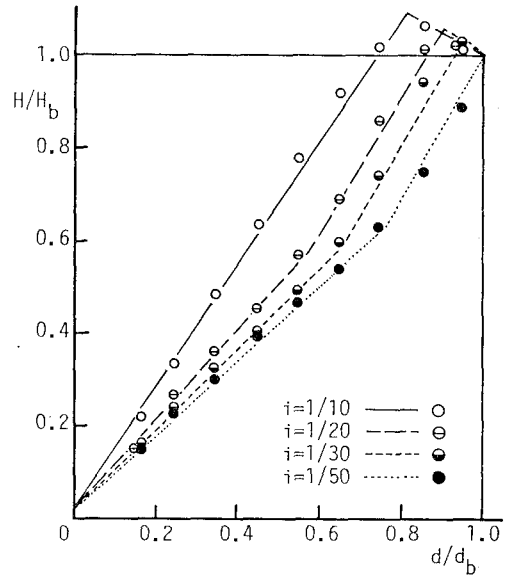


図-7 砕波後の波高変化に対する近似式

とともに Shoaling 領域の波高変化率が減少することがわかる。特に 1/10 斜面の場合この傾向が大きい。しかし (b) からわかるように、斜面勾配が緩やかになるにつれて波形勾配の影響は小さくなり、ここでは示していないが、1/50 ではほぼ無視し得るようになる。3. でも説明したように十分発達した風波の場合、ゼロダウクロス波の波形勾配は 0.01 から 0.06 の範囲内に集中し、この範囲では 1/10 斜面でも波形勾配による差は小さい。したがって、ここでは“十分発達した風波の場合”砕波後の波高変化に対する波形勾配の影響は無視できると結論する。図-7 は次の斜面勾配、領域ごとの回帰直線を示したもので、図中の丸印は d/d_b の 0.1 間隔のデータの平均値である。

$$(H/H_b) = A(d/d_b) + B \quad \dots\dots\dots (2)$$

各領域に対する直線の勾配 A 及び切片 B の値は次のようである。ただし A, B の添え字 S, P および B はそれぞれが Shoaling, Plunging および Bore 領域のものであることを意味する。

Shoaling 領域:

$$\left. \begin{aligned} A_S &= -0.01 \tan \theta - 0.37 \\ B_S &= 1 - A_S \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

Plunging 領域:

$$\left. \begin{aligned} A_P &= 1.65 \exp(-2.3 \tan \theta) \\ B_P &= (H/H_b)_{\text{bore}} - A_P(d/d_b)_{\text{bore}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

Bore 領域:

$$\begin{aligned} A_B &= 0.72 \exp(6.11 \tan \theta) \\ B_B &= 0.02 \end{aligned}$$

*波高が最大となる位置

$$(d/d_b)_{\text{peak}} = (B_F - B_S)/(A_S - A_F) \dots\dots\dots (5)$$

*Bore 出現点の波高および水深

$$\left. \begin{aligned} (H/H_b)_{\text{bore}} &= 0.67 \exp(-3.1 \tan \theta) \\ (d/d_b)_{\text{bore}} &= \{(H/H_b)_{\text{bore}} - B_B\}/A_B \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし $\tan \theta$ は斜面勾配である。Shoaling 領域に対する (3) 式の回帰式の決定の際には碎波点より少し沖側のデータも用いた。

碎波点より岸側での波高変化は Wave set up の影響を受ける。しかし著者らが用いた補正水深は静水深と長周期の水位変動の和を水深と定義している。したがって、ここで与えた各式は結果的に Set up あるいは surf beat 等の影響を除去した式になっている。適用の際には、水深としては静水深と Set up (down) および surf beat 等の影響を加えた値を用いなければならない。

最後に 図-8 は碎波後のデータのばらつきを検討した結果であり、 d/d_b の 0.1 間隔の (H/H_b) の測定値の標

準偏差を示したもので、記号はここまでの図と同じである。図から各斜面勾配とも $\sigma(H/H_b)$ は Shoaling および Plunging 領域では約 0.1 程度の一定値を示し、Bore 領域では水深の減少にともなって小さくなり、 $d/d_b=0.2$ で約 0.05 までになることがわかる。

謝 辞： 実験に際して新谷真清、休位聖吾、真嶋幸弘の各氏（当時学生）の協力を得た、記して深謝する。

参 考 文 献

- 1) Collins, J. I.: Probabilities of breaking wave characteristics, Proc. 12th ICCE, pp. 399~414, 1970.
- 2) Battjes, J. A.: Set-up due to irregular waves, Proc. 13rd ICCE, pp. 1993~2004, 1972.
- 3) 郭 金棟, 郭 秀吉: 風波による碎波の波高減衰と波高の確率分布, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 137~142, 1972.
- 4) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 59~106, 1975.
- 5) 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.
- 6) 磯部雅彦・西村仁嗣・柄登志彦: 不規則波の碎波変形に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 139~142, 1980.
- 7) 樫木 亨・岩田好一朗・石井敏之: 不規則波の碎波変形に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 143~147, 1980.
- 8) 木村 晃・瀬山 明: 斜面上の不規則波の碎波限界について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 174~178, 1986.
- 9) 合田良実・鈴木康正: 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折回折計算, 港研技術資料, No. 230, 45p., 1975.

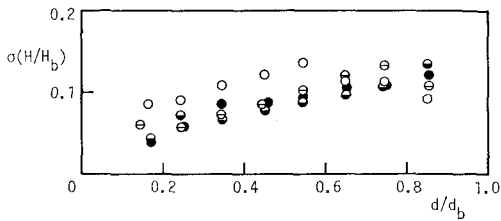


図-8 碎波後の波高のばらつきの標準偏差