

# 正弦波造波に伴う2倍周波数成分の浅水変形, 碎波および汀線付近の波高に及ぼす影響

Effect of 2<sup>nd</sup> high frequency waves induced by sinusoidal wave generation on wave shoaling, breaking and wave height near shoreline

宮前 伸<sup>1</sup>・池田 仁<sup>2</sup>・関 克己<sup>3</sup>・水口 優<sup>4</sup>

Shin MIYAMAE, Jin IKEDA, Katsumi SEKI and Masaru MIZUGUCHI

Sinusoidal wave generation in shallow water produces higher order free waves. These high frequency free waves are responsible for wave height fluctuation in a wave flume. The wave height fluctuations are measured on a sloping bottom, and shown to be explained by KdV models. These high frequency waves also affects wave breaking and wave height decay after breaking, since phase difference between primary waves and second order free waves causes significant change in local wave profile. Role of phase difference is confirmed by a series of experiment with varied slope location relative to wave maker.

## 1. はじめに

数値波動水槽において実務レベルでの計算が可能である近年においても, 複雑な海岸構造物を設計・設置するに当たり, 水理模型実験の果たす役割は重要である. 特に越波量の越波特性の理解のために, 過去に数多くの実験が行われている.

その中で, 細田ら(2007)は沖波波高を固定し, 周期のみ変化させた実験を行い, 越波量が周期によって極値を持ち, 越波量が周期に対して単調増加にならないことを示している. この原因として浅海域での正弦波造波に伴い発生する高周波数成分に着目した解析を行い, 基本周波数成分(とそれに拘束された高周波数成分)と発生する自由波としての高周波数成分との位相差が重要であることを明らかにした. しかしながら, 一様水深部での実験であったため, 斜面上での高周波数成分の挙動については検討していない.

そこで, 本研究では浅海域を対象とした水理実験の際に問題となる正弦波造波に伴う発生高周波数成分に関して, 斜面上の挙動を検討し, さらに碎波および打ち上げ高に対する影響を調べる.

## 2. 実験概要

実験は吸収制御機能を持つピストン型造波機を有する断面水槽において行った. 図-1に実験模型概要図を示すが, 沖側一様水深は25cmで勾配1/20の一様勾配斜面を持つ

つ海底地形であり, 斜面先端は造波機原点から10.70m地点である. なお後述するが斜面の設置位置を変化させた実験も行っている.

造波条件は碎波現象に及ぼすスケール効果を考慮して造波波高7.0cmとしている. 周期 $T$ は1.90~2.90sの範囲を0.05s刻みで変化させて実験を行った.

斜面上では斜面先端から水深 $d=8.5$ cmまで10cm間隔で水面変動データを計測した. また, 汀線近傍( $d=3.5$ cm)の水面変動データも計測した. 水面変動データは分圧式波高計(正豊工学製)を使い計測し, AD変換ボードを実装したノートパソコンにサンプリング周波数100Hzで収録した. 併せて側面よりデジタルビデオにより撮影を行い, 水面変動データと併せて碎波点の特定を行った. また, 容量線を斜面に掘った溝(幅1cm)の中に入れ, 斜面と同じ高さとなるように設置し, 遡上波形を計測した.

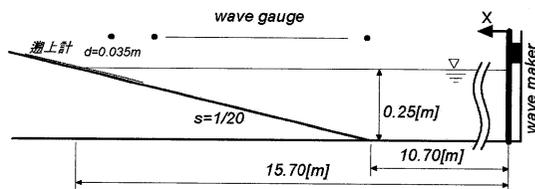


図-1 実験模型概要図 (・は分圧式波高計)

## 3. 一様勾配斜面上での2倍周波数成分の挙動

ここでは, 碎波点以前の浅水変形過程に関する検討を行う. 実験データを基にして斜面上での波形の変化及び2倍周波数成分も含めた波高変化の様子について調べる. また, 周波数展開したKdV方程式による数値計算結果および細田ら(2007)のモデルを一様勾配斜面に応用したモデルとの比較を行う.

1 修(工) 会計検査院  
2 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻  
3 正 会 員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 特別研究員  
4 正 会 員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

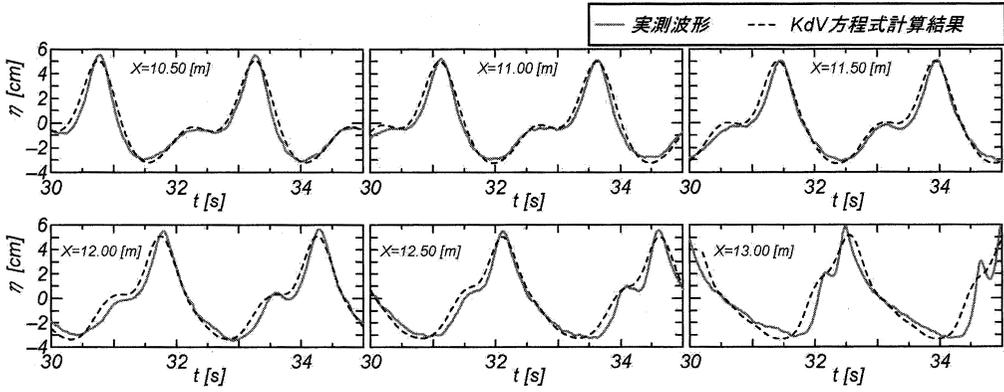


図-2 各地点での波形の実験値とKdV方程式を用いた計算結果の比較 ( $T=2.50s$ )

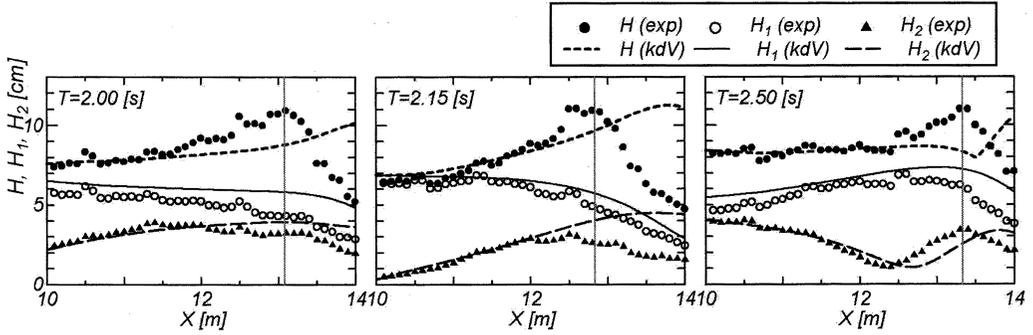


図-3 水位変動の各成分およびトータルの波高 ( $H, H_1, H_2$ ) の変動 (実験結果とKdV方程式を用いた計算結果の比較)

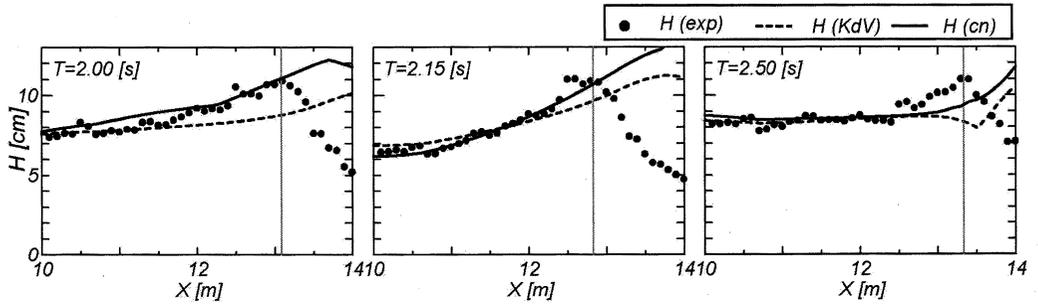


図-4 波高変動 (簡便モデルによる計算結果およびKdV方程式を用いた計算結果, 実験値の比較)

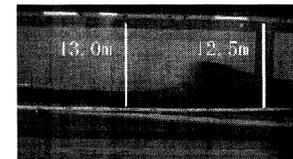


写真-1 砕波時の波形 ( $T=2.15s$ )

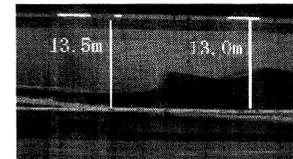


写真-2 砕波時の波形 ( $T=2.50s$ )

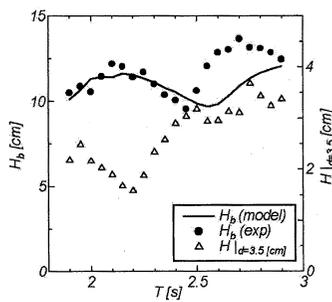


図-5 砕波波高および汀線近傍における波高

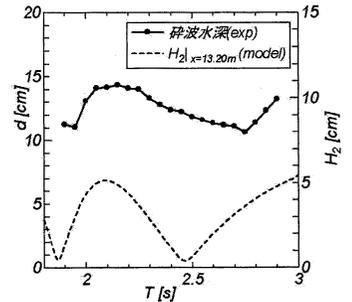


図-6 砕波水深と2倍周波数成分の関係

### (1) 実験データの検討

図-2に周期2.50sのケースに関して各地点で計測された波形およびKdV方程式による計算結果を示す。なおKdV方程式による計算については後述する。図から明らかのように有意な2次波峰が存在し、さらに2次波峰の位相が地点ごとに変化していることがわかる。

図-3には周期2.00s, 2.15s, 2.50sのケースについて計測された波高( $H$ : トータルの波高,  $H_1$ : 基本周波数成分の波高,  $H_2$ : 2倍周波数成分の波高)の岸沖分布およびKdV方程式による計算結果を示す。実験において基本周波数成分は $f < 1.5/T$ , 2倍周波数成分は $1.5/T < f < 2.5/T$ , と定義し, 数値ローパスフィルターを用いて分離している。

図から分かるように, 斜面入射時のそれぞれの波高は周期により異なる。斜面上では基本周波数成分の波高はほぼ一定値を示すが, 2倍周波数成分の波高は斜面上で変動することが分かる。特に, 2.50sのケースでは2倍周波数成分が減少する区間ではトータルの波高はほとんど変化せず, 2倍周波数成分の波高が増大する区間で, トータルの波高が増大していることが分かる。

### (2) 周波数展開されたKdV方程式との比較

ここでは, 高周波数成分の斜面上での挙動について検討するために, 非線形性および分散性を有し, かつ各周波数での変化が見やすい, 周波数展開されたKdV方程式, 間瀬・Kirby (1993)を用いる。

支配方程式については参考文献に詳しいので, ここでは割愛するが, 数値計算方法は造波板位置において境界条件である複素振幅を与える。正弦波造波を対象とするので, 基本周波数成分に対応する周波数に造波波高の振幅を入力し, 位相差はすべての周波数成分でゼロとしている。造波境界から岸に向かい4次のRunge-Kutta法により空間積分していく。

波形について実験結果と数値計算結果を比較したものが前出の図-2である。砕波帯直前の $X=13.00\text{m}$ より沖側では2次波峰の挙動も含めて再現できていることが分か

る。また, 波高の岸沖分布について比較すると, 図-3では砕波帯直前における実験データの波高増大を除けば, 基本周波数および2倍周波数の波高分布も含めて実験結果とよく対応していることが分かる。

### (3) 細田ら(2007)のモデルとの比較

一様水深部でのモデルである細田ら(2007)の簡便モデルを斜面上に拡張する。その際の着目点は各周波数成分の波高変化と位相の表現である。

基本周波数成分および2倍周波数成分の拘束波成分はクノイド波の1次近似解を数学的に分離したものであることから, クノイド波の浅水変形Isobe(1985)により計算する。2倍周波数成分の自由波に関しては微小振幅波により浅水変形および波速を算定する。以下このモデルを簡便モデルと称する。

図-4に簡便モデルと, 実験結果およびKdV方程式による計算結果の波高の岸沖分布を示す。図に示すように, 波高変化に関してはどちらのモデルを用いても同様な結果を与えるが, 砕波点近傍では簡便モデルのほうが実験結果をよく再現する。この原因としては, 間瀬・KirbyによるKdV方程式では, 分散性の精度向上のため浅水変形をGreen則ではなく微小振幅波理論で置き換えているためと考えられる。

## 4. 砕波帯内での2倍周波数成分

### (1) 砕波点および砕波波高

ここからは, 2倍周波数成分の存在および基本周波数成分との位相差が砕波および打ち上げ高にどのように影響するかを検討する。

写真-1, 2に周期の異なる実験ケース (2.15, 2.50s)での砕波時の画像を示すが, 周期2.50sのケースでは2次波峰が存在することが分かる。

図-5には実測の砕波波高と合田(2007)による砕波指標と簡便モデルを組み合わせ, 計算した砕波波高を示す。なお, 同図中にある汀線近傍の波高については後述する。周期が長い所を除くと計算結果と実験結果はよく

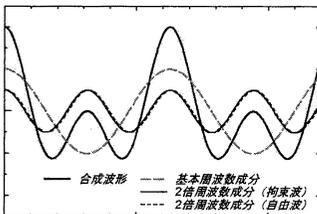


図-7 同位相時の波形

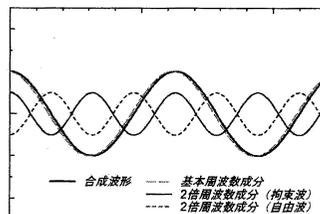


図-8 逆位相時の波形

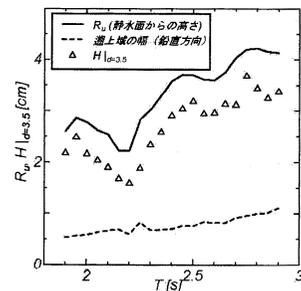


図-9 遡上高と遡上幅, 汀線における波高の関係

一致する。図-6は実測の碎波水深の周期別変化と全ケース平均の碎波位置であった  $X=13.20\text{m}$  での2倍周波数成分波高の計算値(簡便モデル)を示す。

2倍周波数成分が同位相のときは図-7に示す波形となるため、碎波波高が大きくなり、沖で砕け、逆位相の場合は図-8に示す波形となるため、碎波波高は小さくなり、岸で砕けることにより、図-5, 6のような結果となっていると考えられる。

(2) 遡上(打ち上げ高)

ここでは、碎波後の遡上および汀線近傍での波高と2倍周波数成分の影響について検討する。

図-9は打ち上げ高および汀線近傍 ( $d=3.5\text{cm}$ ) の波高と周期の関係を示したものである。打ち上げ高は汀線近傍の波高と対応し、図-5に示されているように碎波波高と逆の変動となっていることが分かる。碎波時において2倍周波数成分が同位相となると、尖った波形となり、激しく碎波し、エネルギーが大きく減衰するため、汀線近傍における波高が小さくなるものと考えられる。

5. 斜面設置位置を変えた実験

以上、実験結果をまとめると、2倍周波数成分の自由波の影響により、碎波帯内の波の挙動は以下のように考えられる。

①碎波点近傍において2倍周波数成分が同位相となる周

期で碎波波高が大きく、沖側で碎波する。

②碎波波高が大きい場合、激しく砕けるためエネルギー減衰が大きく、打ち上げ高は小さくなる。

碎波点近傍における2倍周波数成分の位相関係が碎波および汀線近傍の波高にかなりの変動をもたらす。

確認実験として、斜面設置位置を変更する事により同一周期で碎波点での位相が異なる実験を行う。  $T=2.15\text{s}$  に固定し、斜面の先端位置  $X_s=6.70\sim 10.70\text{m}$  に変動させたときの2倍周波数成分の位相差の計算値を ( $X_s=3.0\sim 12.0\text{m}$ ) 図-10に示す。  $X_s=6.70\text{m}$  付近で逆位相となり、  $X_s=10.70\text{m}$  付近で同位相となることがわかる。よって、汀線での波高は  $X_s=6.70\text{m}$  付近で極大となり、  $X_s=10.70\text{m}$  のときに極小となり、2次波峰が現れることが予測される。そこで、  $T=2.15\text{s}$ ,  $H_s=7.0\text{cm}$  と固定したまま、斜面先端位置  $X_s=6.70, 7.70, 8.70, 9.70\text{m}$  と変え、汀線における波高変動を調べた。

図-11に汀線近傍において測定した波高および碎波波高を示す。碎波波高は予測どおり、斜面先端が  $X_s=6.70\text{m}$  のときに小さくなり、  $X_s=10.70\text{m}$  のときに大きくなった。一方、汀線近傍の波高は逆の変動を示した。図-12に汀線近傍における波形を示す。このように、碎波点における2倍周波数成分の位相関係により、汀線における波形が変化する。特に、碎波点において2倍周波数成分が同位相となるとときに汀線の波形に2次波峰が現れている。

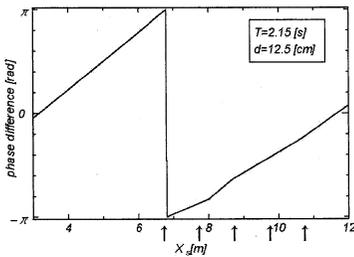


図-10 斜面設置位置と2倍成分の平均碎波点での位相差 ( $d=12.5\text{cm}$ )

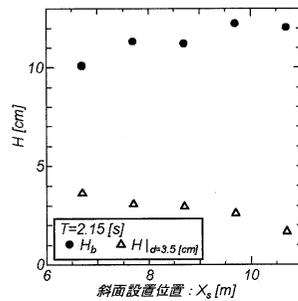


図-11 碎波波高および汀線近傍での波高と設置位置の関係

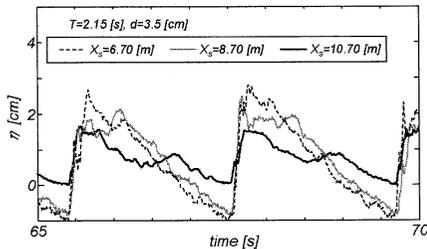


図-12 斜面位置の違いによる汀線近傍における波形の変化

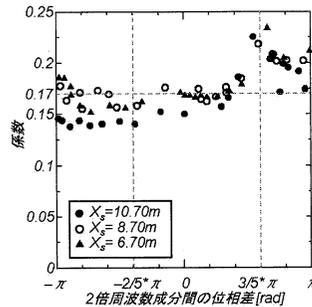


図-13 2倍成分の位相差と碎波指標式の係数

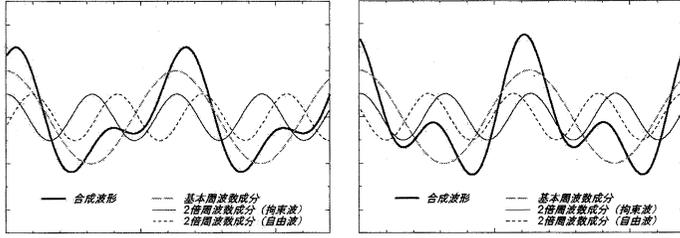


図-14 (a) 位相差 $3\pi/5$ の時の時系列波形

図-14 (b) 位相差 $-2\pi/5$ の時の時系列波形

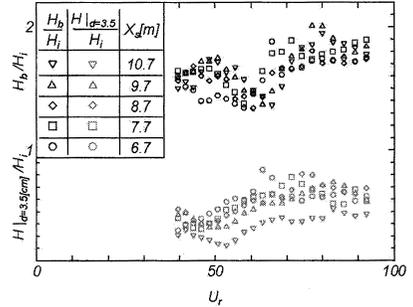


図-15 砕波波高, 汀線近傍の波高の変動幅

## 6. 既往の砕波指標と実験結果の比較

ここでは既往の砕波指標式におけるデータのバラツキについて2倍周波数成分の影響を踏まえて検討するものである。

既往の砕波指標式として最もよく用いられる合田(2007)による砕波指標式について検討する。合田(2007)による砕波指標式は, 規則波による実験データを整理することにより, 以下の式で整理されている。

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left[ 1 - \exp \left[ -1.5\pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 11s^{4/3}) \right] \right] \quad (1)$$

また, 本実験での海底勾配 $1/20$ のケースでは砕波指標式と実験値の比較との比較では変動係数は11.3%であったと報告されている。

ここでは, 式(1)の左辺および右辺の中括弧内を実験値より算定し, 式(1)中の比例係数と2倍周波数成分の位相関係について検討する。

図-13に2倍周波数成分の拘束波と自由波の位相関係と式(1)の比例係数の結果を示す。ここで2倍周波数成分の位相差は全ケース平均の砕波水深に対応する地点での簡便モデルでの計算結果である。

図-13から比例係数は平均的には0.17の値をとることが分かる。また, 比例係数は5割程度変動しており, 位相差が $3/5\pi$ の時に係数が最大となることが分かる。比例係数が大きいということは砕波波高水深比が大きいということであり, 砕波しにくい(浅くなるまで砕波しない)ことを表す。この位相差のときの計算波形を図-14(a)に示すが, 基本周波数の波形の前面に2倍周波数成分による山があり結果的に前面の波形勾配が小さくなることにより, 砕波しにくいと考えられる。図-13において極小値は明確ではないが, 逆位相に当たる $-2/5\pi$ の時の波形を図-14(b)に示す。図-14(a)とは逆に波形前面に2倍周

波数成分による谷が存在し, 波形勾配が大きくなることにより砕波し易いと考えられる。

図-15は砕波波高, 汀線近傍の波高の変動幅とアーセル数 $V_r$ の関係を示すものである。造波に伴い発生する2倍周波数成分の位相関係が砕波に影響を及ぼし, 砕波波高は±20%程度, 初期汀線における波高は±50%程度の変動があることが分かった。

## 7. おわりに

本研究では, 浅海域での正弦波造波に伴い発生する高周波数成分が, 斜面上での浅水・砕波変形および汀線近傍での波高に対してどのような影響があるかの検討を行った。以下に得られた結論を示す。

- ①斜面上においても2倍周波数成分の影響により, 波高・波形が変化する。
- ②簡便モデルを適用することにより, 砕波に至るまでの斜面上での波高が予測できることを示した。
- ③2倍周波数成分の位相関係によって砕波波高, 砕波水深が5割程度変動し, 従来の砕波指標式から外れる場合がある。
- ④砕波時における2倍周波数成分の位相関係によって砕波し易い波形, し難い波形が存在する。
- ⑤汀線近傍における波高も砕波波高の変動に応じて変化するが砕波波高の大きい時は小さくなる。

## 参考文献

- 合田良美(2007): 工学的応用のための砕波統計量データの再整理, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.81-85.
- 細田勝也・宮前伸・関克己・水口優(2007): 浅海域における正弦波造波に伴う2倍周波数成分の越波に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.736-740.
- 間瀬肇・J. Kirby(1993): 不規則波のハイブリッド型断面2次元非線形変形理論, 土木学会論文集, No.479/II-25, pp.91-100.
- Isobe, M.(1985): Calculation and application of first-order cnoidal wave theory, Coastal Eng., Vol.9, pp.309-325.