

波群性に起因する長周期波に及ぼす海底勾配の影響

山本吉道*・谷本勝利**

1. はじめに

海岸に押し寄せる実際の波は、大きな波と小さな波が比較的規則的に現れるという波群性を有している。これが原因となって、surf beatと呼ばれる数十秒～数分の長周期波（または、津波などの長波と区別するために、長周期重力波とも呼ばれる）が発生し、砕波帯内で顕在化する。一方、通常周期の波は斜面上で砕波し、そのエネルギーを低下させていく。この通常周期の波の減衰傾向は海底勾配が緩くなるほど顕著になるため、海底勾配の緩い海岸であるほど、長周期波が波の遡上と越波、さらには海浜の地形変化に及ぼす影響は無視出来なくなる。山本・谷本（1993, 1994）によると長周期波の影響は砕波帯内の平均海底勾配が1/20程度より緩くなると支配的となる。

長周期波の発生機構を説明する理論は種々発表されているが、特に、二次元的な視点のものとして、Longuet-Higgins・Stewart（1962）の水位の波群性による周期的変動（Bound Long Waves）が砕波による波群の消滅とともに開放されて自由長周期波になると考えたもの（これに基づく長周期波を以降 BLW と呼ぶ）と、Symondsら（1982）の砕波位置が波群性によって周期的に変動することにより長周期波（Breakpoint Forced Long Waves）が発生すると考えたもの（これに基づく長周期波を以降 BFW と呼ぶ）が良く知られている。

そして、間瀬・岩垣（1985）は波の変調不安定現象が波群性の主要因になり得ることを、喜岡ら（1990）はこの変調波による長周期波の実験から、Symondsらの理論が定性的には妥当なことを示している。また、加藤ら（1991）はSymondsらの理論的モデルを改良すれば、彼らの現地観測の結果と良く合うことを示している。一方、合田ら（1990）はBLW理論を発展させて、波平均水位に関する浅海長波理論に基づいた数値モデルをradiation stress項を外力項として付け加えて構築し、このモデルによって長周期波を比較的良く再現出来ることを示した。また、List（1992 a, 1992 b）は合田らより単純な線

形数値モデルを用い、radiation stress項を砕波帯内のみで考慮した場合の長周期波がBFWで、砕波帯外のみで考慮した場合がBLWであると考えて、数値実験を行い、一般的な断面形の海岸ではBLWの方がBFWより卓越し易いことを示している。

この様に、二次元的な取扱に関して数多くの研究が成されているが、まだ、どのような場合にどちらの理論が卓越するか詳細には明らかにされていない。本研究は長周期波の数値モデルによる検討から、この点の解明を行ったものである。

2. 長周期波数値モデル

(1) 長周期波の数値モデルの構築

傾斜海岸における波群性に起因する長周期波の発生と岸沖方向の伝達を対象とした数値モデルを考える〔遡上モデルについてはYamamotoら（1994）および山本ら（1994）で検討している〕。波群性に起因した長周期波は砕波帯内外の浅海域で増幅されることから浅海長波理論をベースとし、外力項として波群に対応して変化するradiation stressの勾配の項を浅海長波の運動方程式に組み込む。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial q}{\partial t} + g(h + \xi) \frac{\partial \xi}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ξ は波平均水位で、setup量と長周期変動量から成る。 q は線流量〔 $=U(h+\xi)$ 〕、 U は長周期波の水平流速、 h は水深、 t は時間、 x は沖から岸への空間座標、 g は重力加速度、 S_{xx} はradiation stress、 ρ は海水の密度である。

この数値モデルは本研究の目的に沿って、最低限必要なだけの精度を持たせるようにしたものである。すなわち、長周期波の発生に直接係わってくることから、群速度でradiation stressが伝播かつ変化するようにListのモデルを改良し、砕波の判定には合田の砕波指標（1975）を、砕波後の波高変化には間瀬ら（1986）の浅水・砕波モデルを用いている。さらに、簡便化のために移流項と海底摩擦項は無視してあるが、砕波帯内の水深に平均水

* 正会員 工博 (株)アイ・エヌ・エー 海岸環境部課長

** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科

位の変動を考慮しない場合の汀線付近での計算値と実測値との誤差は非常に大きいので、水深にこの変動を考慮している。そして、BFWの計算は radiation stress の分布を砕波帯内のみで与えることにより、また、BLWの計算は radiation stress の分布を砕波帯外のみで与え、さらに沖側境界から Longuet-Higgins・Stewart の理論式による BLW を与えることにより行う。ただし、沖側境界の水深は入力波長の 1/10 以上とした。これは、彼らの理論式は、これより浅いと過大な BLW を与えることによる。また、本モデルによる BFW と BLW を合成した波は水深に平均水位の変動を考慮しているために、全域で radiation stress の分布を与えて求めた全長周期波と完全には一致しない。

(2) 不規則波への適用法

実際の波は不規則波であるが、簡便化のために、一つの波群に対する沖側境界での入力波高の時系列を次式で近似する。

$$H_0 \doteq H_{0m} - a_H \sin(2\pi t/T_L) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 H_{0m} は平均波高、 a_H は変動振幅、 T_L は波群の周期である。

Longuet-Higgins・Stewart の BLW 理論式に式(2)を代入すれば、BLW の波高は近似的に次式で表せる。

$$\frac{H_L}{H_{0m}} \doteq \frac{3}{4} \left(1 - \frac{c_g^2}{gh}\right)^{-1} \cdot \frac{a_H}{h} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 c_g は群速度で h と周期 T の関数である。

式(3)で、 T の分布幅が狭いと仮定するならば、 H_L の分布は近似的に a_H の分布に対応する。すなわち、長周期波の統計値に対する入力波高の時系列を特定の a_H を用いた式(2)で表せる。加藤ら (1991) の研究によると長周期波の有義波高に対する変動振幅は次式で表される。

$$H_{L1/3} \text{ に対する } a_{H1/3} \doteq 0.4714 H_{01/3} \dots\dots\dots (4)$$

また、Yamamoto ら (1994) および山本・谷本 (1994) の研究によると、長周期波の平均波高と有義波高の関係は $H_{Lm} \doteq H_{L1/3}/1.5$ であるから、変動振幅の平均値と有義値の関係は $a_{Hm} \doteq a_{H1/3}/1.5$ と表せ、長周期波の平均波高に対する変動振幅は次式のようになる。

$$a_{Hm} \doteq 0.4714 H_{01/3}/1.5 \doteq 0.5 H_{0m} \dots\dots\dots (5)$$

3. 各種海岸断面への適用

(1) BFW の検証

本数値モデルから求まる BFW が Symonds らの BFW に対応していることを確認する。

List は海底勾配 1/40 の一様断面の海岸に、水深約 8 m での平均波高 0.8 m、変動振幅 0.4 m、平均周期 8.0 s、波群の平均周期 61.6 s になる波群を入射させたときの BFW を計算している。同じ計算を本数値モデルと山本・谷本 (1994) が Symonds らの理論を改良して求めた理論

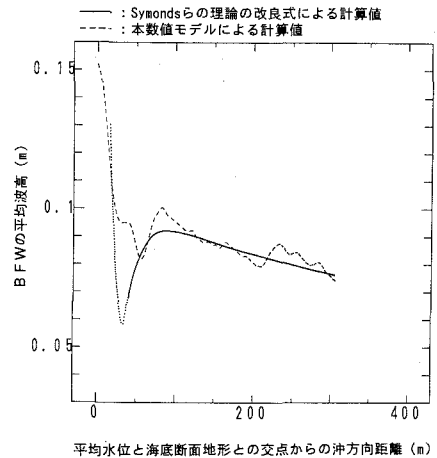


図-1 一様勾配海岸での BFW の平均波高の岸沖分布

式を用いて行い、得られた長周期波の平均波高の分布を図-1に示している。図中の破線は本数値モデルによる計算結果、実線(水深 1 m より浅い区間は点線にしてある)は理論式による計算結果である。本数値モデルでは海底面より水位が下がらないように処置してあるため、理論式の計算値とは、汀線近くで合わなくなっているが、50 m 程度より沖合では良く合っている。

これより、本数値モデルによる BFW の計算は砕波帯内のみで radiation stress の分布を与えることによって得られると考えて良いと判断される。

(2) 海底断面が長周期波に及ぼす影響

a) 一般的な海岸断面の場合

List は図-2に示す水深 0.8 m 以浅は急勾配で、それ以深は海底勾配が 1/70 程度と緩い海岸に、沖での平均波高 0.36 m、変動振幅 0.09 m、周期 10.9 s、波群の周期 70 s の波群を入射させたときの計算を行っている。同じ計算を本数値モデルで行い、得られた長周期波の波高分布を図-3に示している。図中の破線が BLW を表しているが、List の計算結果と同様に BLW が卓越している。

これは、長波近似領域では長周期変動の伝播速度と波群の群速度が等しくなり、両者の間に共振現象が生じるようになる。したがって、本ケースのように、砕波帯外に群速度が長波の位相速度に近い浅海域が広がっている場合には BLW が十分に発達できるのに対して、砕波帯内の海域は狭くて、BFW が十分に発達できないからと考えられる。

なお、図-3には典型的な重複波モードが現れているが、BFW がより低次のモードとなる理由は、長周期波の波長に比べて砕波帯幅が狭いからと考えられる。

b) ステップ状海岸断面の場合

浅海域の特徴が砕波帯内と外で図-2と逆になる場合

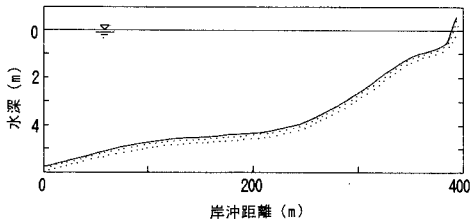


図-2 一般的な海岸断面地形

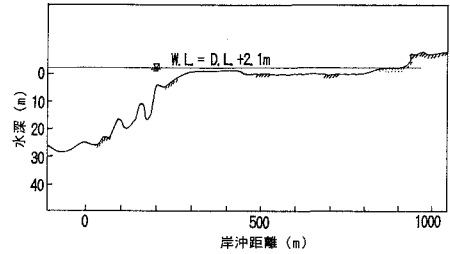


図-4 リーフ海岸断面地形

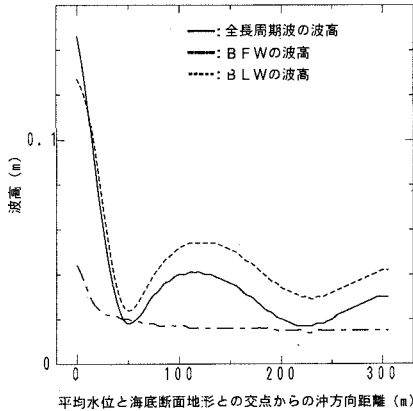


図-3 一般的な海岸での長周期波の波高の岸沖分布

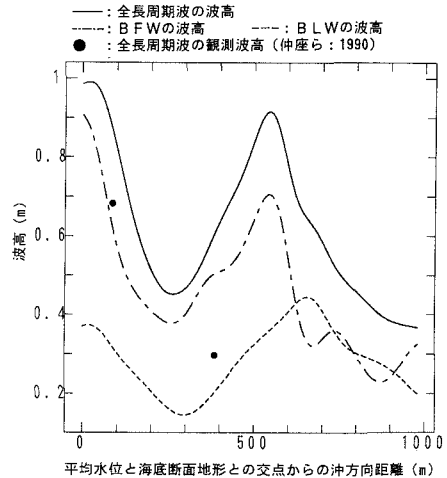


図-5 リーフ海岸での長周期波の波高の岸沖分布

は、BLW に替わって BFW が卓越すると考えられる。図-4 に示すリーフ海岸に、沖での平均波高 2.88 m、変動振幅 1.81 m、周期 13.8 s、波群の周期 258 s の波群を入射させたときの計算結果を図-5 に示す。

これによると、BFW が卓越している。これは、大きな砕波変動によって大きな BFW が発生し十分に発達できるステップ状浅海域が存在するためと考えられる。

また、図中の●は Nakaza ら (1990) による現地観測データであるが、これと計算値との比較より、本数値モデルによる再現性は単純なモデルのわりには良いと判断される。

さらに、図-4 に類似した図-6 に示すステップ状海岸断面を考えて、沖での平均波高 2.0 m、変動振幅 1.0 m、平均周期 8.0 s、波群の平均周期 80 s の波群を入射させたときの計算結果を図-7 に、また、各々の平均周期は同じで、沖での平均波高と変動振幅を各々 0.4 m と 0.2 m に小さくしたときの計算結果を図-8 に示す。両図の縦軸は長周期波の平均波高を入力波の平均波高で無次元化したものである。

図-7 では、ステップ前面の斜面での砕波変動によって発生した BFW が発達できる浅海域が砕波帯内に広がっているため BFW が発達し、図-8 では、ステップ状浅海域が砕波帯外に広がっているため BLW が卓越してい

る。これは上記の発達機構を裏付けるものである。

c) 一様海底勾配の海岸断面の場合

以上の検討から、長波近似の成り立つ浅海域が砕波帯外に広く存在すれば BLW が発達し、砕波の変動が大きく、かつ浅海域が砕波帯内に広く存在すれば、大きな BFW が発生し発達することが明らかになったが、一様海底勾配の海岸の場合にはどのようなになるであろうか。一様な海岸の海底勾配を 1/20~1/100 の間で変えて、波群 (平均波高 2 m、変動振幅 1 m、平均周期 7 s と 10 s、波群周期 100 s) を入射した場合の長周期波の計算を行い、得られた setup を考慮した汀線位置での最大水位を図-9 に示す。

本図に見られるように、変動振幅/平均波高=0.5、平均波高/沖波波長=2/(1.56×72~102)≒0.0262~0.0128 に対しては、海底勾配が急になるほど BLW は発達しにくくなり、海底勾配 1/20 程度で BLW と BFW はほぼ同程度になっている。これは急勾配になるほど、砕波帯外に長周期波が発達出来る浅海域が狭くなるからと考えられる。なお、実際の汀線位置での最大水位は、海底勾配が緩くなると海底摩擦によって減衰するため、海底勾配

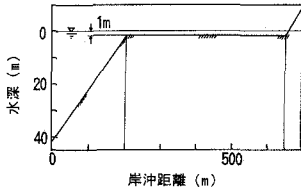


図-6 モデル海岸断面地形

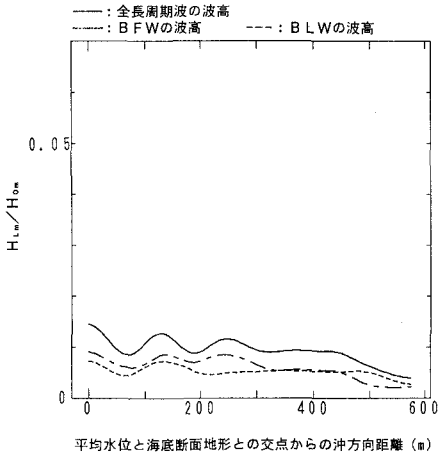


図-7 長周期波の波高の岸沖分布 ($H_{0m}=2.0\text{ m}$)

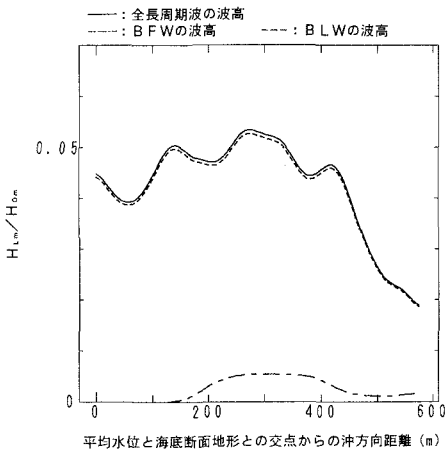


図-8 長周期波の波高の岸沖分布 ($H_{0m}=0.4\text{ m}$)

が緩くなるにつれて、本計算値ほど大きくはならない。

次に、上記の長周期波の発達機構が正しいならば、海底勾配が同じでも、入力波群の周期が長くなるほど、長波近似の成り立つ海域が砕波帯外に広がるため、BLWが発達し易くなると考えられる。

この確認のために、海底勾配 1/40 の一様な海岸に平均周期を 7s~16s の間で変化させて、波群 (平均波高 2

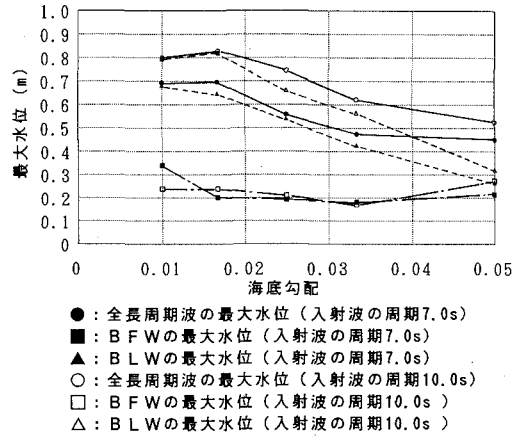


図-9 水深 0m での長周期波の最大水位と海底勾配との関係

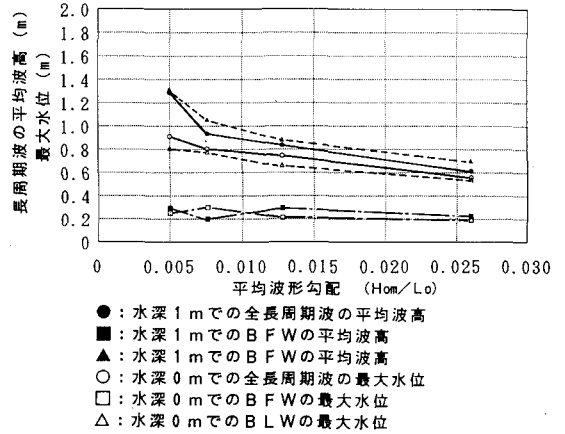


図-10 長周期波の平均波高 (または最大水位) と入射波の平均波形勾配との関係

m, 変動振幅 1m, 波群周期 100s) を入射した場合の長周期波の計算を行い、得られた水深 1m 地点での平均波高を図-10 に示している。

平均周期が長くなるほど、すなわち、波形勾配が小さくなるほど、BLW が大きくなっており、上記の長周期波の発達機構と整合した結果となっている。

4. むすび

本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

波群性に起因した長周期波を精度良く計算できる数値モデルを波平均水位に関する浅海長波理論に基づいて構築した。そして、この数値モデルによる数値実験から、以下のことが明らかになった。

長波近似領域では、長周期波と波群の伝播速度が等し

くなる。それゆえ、長波近似の成り立つ浅海域が碎波帯外に広がっていけば、長周期波と波群の間の共振現象によって、BLWが発達し卓越する。その逆に、浅海域が碎波帯内に広がっていけば、BFWが発達し卓越する。また、同様海底勾配の海岸では、海底勾配が緩くなるほど、BLWの発達海域がより広がるようになるため、BLWが卓越するようになることが明らかとなった。

これらの知見より、碎波帯内が急深で、それより沖合で緩勾配となる侵食性海岸や、遠浅海岸では、BLWが卓越し易く、碎波帯内に十分な浅海域を有するステップ状海岸ではBFWが卓越し易いと言える。

さらに、同一海岸では、入射周期が長くなるほど、碎波帯外に長波近似領域が広がるため、BLWが発達し卓越する傾向にあると言える。

参 考 文 献

- 加藤一正・中村聡志・池田直太 (1991): 波の連なりを考慮した長周期波の波高の推定, 港湾技術研究所報告第 30-1 号, pp. 137-163.
- 喜岡 涉・川合正恭・田村真一 (1990): 非線形変調波に伴う長周期水位変動について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 91-95.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告第 14-3 号, pp. 59-106.
- 合田良実・諫山太郎・佐藤慎司 (1990): 碎波帯内の長周期波の発達機構に関する実験と現地観測, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 96-100.
- 間瀬 肇・岩垣雄一 (1985): 波の変調不安定理論に基づく現地波浪の Wave Group 特性の解析, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 184-188.
- 間瀬 肇・松本明男・岩垣雄一 (1986): 不規則波の浅水・碎波変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第 375 号/II-6, pp. 221-230.
- 山本吉道・谷本勝利 (1993): 不規則波の遡上・打ち上げ形態の研究, 第 48 回年次学術講演会概要集 II, pp. 768-769.
- 山本吉道・谷本勝利 (1994): 波群性に起因する長周期波と海岸への遡上に関する研究, 土木学会論文集, 投稿中.
- 山本吉道・谷本勝利・中村廣昭 (1994): 波群性に起因する長周期波の海岸への遡上, 第 49 回年次学術講演会概要集 II, 投稿中.
- List, J. H. (1992 a): A model for the generation of Two-dimensional surf beat, *Jour. of Geophys. Res.*, Vol. 97, No. 4, pp. 5623-5635.
- List, J. H. (1992 b): Breakpoint-forced and bound long waves in the nearshore, *Proc. of 23 rd ICCE, ASCE*, pp. 860-873.
- Louquet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "Surf Beat", *Jour. of Fluid Mech.*, Vol. 13, pp. 481-504.
- Nakaza, E., S. Tsukayama and M. Hino (1990): Bore-like surf beat on reef coasts, *Proc. of 22nd ICCE, ASCE*, pp. 743-756.
- Symonds, G., D. A. Huntley and A. J. Bowen (1982): Two-dimensional surf beat: long wave generation of a time-varying breakpoint, *Jour. of Geophys. Res.*, Vol. 87, No. C 1, pp. 492-498.
- Yamamoto, Y., K. Tanimoto and K. G. Harshinie (1994): Runup of irregular waves on a gentle slope beach, *Abstracts of 24th ICCE, ASCE*.