汀線付近における入射長周期波と沖合の波の関係

Relationship between Incident Long Waves near the Shoreline and Offshore Waves

内山孝平¹・水口 優²

Kohei UCHIYAMA and Masaru MIZUGUCHI

Long waves are known to play a dominant role in the swash zone hydrodynamics during storms. Here an attempt to relate the wave properties of the incident long waves to those of offshore waves is carried out by using field data. Equivalent deepwater significant wave height of the incident long waves near the shoreline is shown to be expressed by an empirical formula with significant wave height and mean period at offshore. In addition, applicability of a separation method of incident and reflected waves for long waves on a sloping beach (SLSS) is discussed.

1. はじめに

海岸侵食や港湾内副振動などの海岸災害の要因の一つとして、汀線付近における周期数十秒から数分のオードの長周期波が挙げられる。その長周期波は波形勾配が非常に小さく岸沖方向に重複波を形成するため、高波浪時の汀線付近においては、碎波してエネルギーをほとんど失う短周期波に代わって主要な成分となっていると考えられる。従って、その長周期波の特性を把握し、沖合の波からの予測を可能にすることは重要である。これまでも、浅海域での長周期波に関する研究は多く行われているものの、長周期波を入反射波分離した後に沖合の波との関係に着目した研究は未だ無い。

本研究では、自然海浜における現地観測データをもとに、汀線付近の入射長周期波諸量と沖合の波の諸量の関係を検討する。あわせて、斜面上における入反射波分離手法の検討も行う。

2. 現地観測概要

現地観測は茨城県波崎海岸に位置する（独法）港湾空港技術研究所の波崎海洋研究施設（HORS、図-1）において行った。図-2に示すように、観測栈橋に空中発射型超音波式水位計を設置し、サンプリング周波数5Hzで連続収録したデータを使用する。なお、2時間のデータを1つのセットとし、汀線付近の波として主にch.16地点における水位変動データを使用する。また、汀線付近ということで、直角入射の一方向波として取り扱う。

沖合の波には鹿島沖NOWPHAS（沖合約2.8km、水深約24m、図-1中Wave Gage地点）の生データを使用する。毎偶数正時の前後10分、計20分間において、水中発射型超

音波式水位計によりサンプリング周波数2Hzで取得したものである。碎波などによりデータにノイズが入っている場合にはその部分を除いた使用可能な連続データを使用する。また、データ数²⁹個、時間にして約5分間の連続データがないデータセットは解析対象外とした。

解析に使用するデータは、2003年及び2004年において高波浪が襲来したうちの3ケースである。表-1に各ケースの沖合の波の最大有義波高、気象状況を示す。ケースⅠは期間中最大、ケースⅡはきれいな山型の波高の増減が

図-1 現地観測位置

図-2 水位計設置位置

表-1 解析ケース

case	date/time	$H_{1/3,max}$ [m]	Meteorological condition
I	2003/09/19 22:00-09/26 22:00	6.42	Typhoon 0315
II	2004/10/19 08:00-10/26 00:00	4.07	Typhoon 0423
III	2004/01/06 16:00-01/14 08:00	4.30	Low Pressure

1 中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻
2 正会員 工博 中央大学教授理工学部都市環境学科

図-3 断面地形

図-4 水深変化補正後の波高(添え字*)と未補正時の波高比

図-5 生データのクロススペクトル解析結果

見られる台風が襲来した期間であり、ケースⅢは冬季の低気圧の通過による高波浪期間である。また、図-3に示す高波浪前後の断面地形からわかるように、ケースⅠ及びⅢは汀線付近において大きな侵食、ケースⅡは汀線付近においては地形変化がほぼ無い期間である。

3. 斜面上における入反射波分離

(1) 斜面上における入反射波分離手法について

現地不規則波浪場に対する入反射波分離手法の一つとして、一様水深部での水位計群による手法（以下SLSM, 関ら, 2004）がある。SLSMは3本以上（ここでは3本）の水位計データに微小振幅波理論解を最小二乗法を用いて当てはめることにより、入射波と反射波を求めるものである。このSLSMに、斜面上すなわち水深変化に対する補正を二種加えた手法（以下SLSS）の現地観測データに対する適用性を検討する。加える補正の一つ目は水位変動の大きさに関するものである。浅水変形による波高変化を基準点（分離地点）における水深を用いてGreen則により式（1）に示す補正を行う。

$$\eta_j^* = \left(\frac{d_j}{d_s} \right)^{1/4} \eta_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η_j^* : 補正後の水位変動、 d_j : 補正地点の水深、 d_s : 分離地点の水深、 η_j : 補正前の水位変動である。今回解析したケースにおいては、補正後の水位変動は補正前の74~100%となる。二つ目は水位計間隔に関する補正である。長波の波速を仮定することで、水深変化によ

る波速の違いを以下のように水位計間隔に反映させる。

$$\frac{\Delta x^*}{\sqrt{gd_s}} = \int_0^{\Delta x} \frac{1}{\sqrt{gd(x)}} dx \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Δx^* : 補正後の水位計間隔、 d_s : 分離地点の水深、 Δx : 補正前の水位計間隔、 g : 重力加速度、 $d(x)$: 水深である。補正後の水位計間隔は、補正前の73~114%となる。図-4 (a), (b) は両者の補正を行う事による入射波及び反射波各々の波高の違いを補正前との比率で、代表的なケースについて示したものである。入射波及び反射波の波高とも、2地点の水深差が増加するとともにほぼ直線的に減少（ここでは沖側の水位計（ch.17）を基準に補正しているため）している。この図から、測定点の水底勾配が1/50を超える場合は、補正が分離後の水位変動に対して影響していることがわかる。

なお、SLSSは線形長波近似及び場の一様性を仮定したものであるため、非線形性の強い浅海域、特に碎波する風波成分に関しては適用が不可能である。そのため、汀線付近でも非碎波で存在する長周期波成分に対してのみ分離を行う。長周期波成分はスペクトルの裾の位置を考慮して、 $f \leq 0.04\text{Hz}$ （周期にして25s以上）とした。 $f \geq 0.04\text{Hz}$ の短周期成分は碎波し反射率は0と考える。さらに、 $f \leq 0.002\text{Hz}$ の範囲は波ではなく摩擦がより作用して流れとなると考え、その周波数帯のパワーを取り除いた。

(2) 結果

ここでは、汀線付近での顕著な地形変化（侵食）を含む期間であるケースⅠの侵食前後における解析結果を示

す。まず、入反射波分離前の波の特性を知るために、汀線付近の2地点 (ch.14, 17) における分離前の水位変動データを用いてクロススペクトル解析を行った (図-5 (a), (b))。なお、潮汐成分は生の水位変動データを2次曲線で回帰し、差し引く方法により取り除いている。図-5 (a), (b) 上段のコヒーレンスの谷、中段の位相関係のステップ形状及び下段のパワースペクトルにおける腹節構造的な形状から、長周期波成分において岸沖方向に重複波を形成していることがわかる。また、侵食による斜面の緩勾配化に伴い重複波を形成する周波数帯が狭くなる (長周期波の反射率が低下する) 様子も見える。

図-6 (a), (b) はSLSSによる入反射波分離結果の水位変動時系列 (ch.17地点) である。ただし、ch.15, 16, 17地点の水位変動データを用いて分離した。図-6 (a), (b)

(a) 侵食前 (急勾配)

(b) 侵食後 (緩勾配)

図-6 入反射波分離結果

からわかるように、分離後の入射波と反射波の和が分離前の長周期波とよく一致している。また、侵食後は入射波に対する反射波の振幅が侵食前と比べて小さくなっていることから、侵食による斜面の緩勾配化に伴う反射率の低下がよく表現されていることがわかる。

次いで、分離後の2地点 (ch.14, 17) における入射波及び反射波同士の水位変動データを用いてクロススペクトル解析を行った (図-7 (a), (b))。ただし、ch.14地点の分離にはch.13, 19, 14地点のデータを用いた。図-7 (a), (b) から位相差が直線的に増減していることから、入射波それぞれが進行波として表現されていることがわかる。反射波同士の結果のうち0.02Hz以上の周波数帯において、コヒーレンスが低下し、位相差が直線的に変化しないのは、その周波数帯のパワーがほとんど無いためと考える。また、図-7 (b) の低周波数側においてもコヒーレンスが低下する。これは緩勾配斜面では低周波数側において摩擦がより作用する状態となることが原因と考えられる。

以上より、誤差はあるものの、SLSSによる入反射波分離は現地観測データに対して十分に適用可能と言える。

4. 汀線付近における入射長周期波と沖合の波の特徴

ここでは、汀線付近における入射長周期波と沖合の波それぞれの特徴について、スペクトル解析的視点から述べる。なお、これ以降の汀線付近の波は、全体としてノ

(a) 侵食前 (急勾配)

(b) 侵食後 (緩勾配)

図-7 入射波及び反射波のクロススペクトル解析結果

(a) ケース I

(b) ケース II

(c) ケース III

図-8 汀線付近における入射長周期波のスペクトル経時変化

図-9 沖合の波のスペクトル経時変化

図-10 汀線付近の入射長周期波と沖波諸量の時間変化

イズの少ないch.16地点におけるものであり、分離にはch.14, 15, 16地点のデータを用いた。

(1) 汀線付近における入射長周期波について

図-8 (a), (b), (c) は各ケースの嵐による高波浪ピーク前後における汀線付近の入射長周期波のスペクトル経時変化である。図-8 (a) に示すケース I では、ピークのはっきりしないスペクトル形から、波浪の増大に伴い0.01Hz付近にピークを持ち、かつ広い周波数帯(0.005~0.02Hz)で卓越したパワーを有するスペクトルに変移している。次に図-8 (b) に示すケース II は、ケース I の前半と似て、ピークのはっきりしないスペクトル形である。また、形状の変化があまり見られないのは、ケース I 程に波浪が増大しないためと考える。図-8 (c) に示すケース III では、全体を通してケース I と似た傾向が見られる。ただし、波浪最大時(図中赤実線)におけるスペクトルの幅に違い(ケース III の方が広い)が見られる。

(2) 沖合の波について

図-9 (a), (b), (c) は図-8 (a), (b), (c) に対応する各ケースにおける沖合の波のスペクトル経時変化を示し

たものである。3ケースに共通して、ピークのはっきりしないスペクトル形から、波浪の増大に伴い低周波数側(0.08Hz付近)にピークを持つ尖ったスペクトルに変移していることがわかる。また、沖合の波には長周期波成分($f \leq 0.04\text{Hz}$)は存在しない。

次いで、図-10 (a), (b), (c) に各ケースの汀線付近の波と沖合の波の諸量の時系列を示す。3段目には沖合の波のスペクトル幅パラメータ v を示している。なお、生のデータから求めたものに加え、1次成分のみ(添え字1)の周波数帯成分($0.04 \leq f \leq 1.5f_p$)で求めたものを算定した。 v_1 の時間変化を見ると、ピーク周波数 f_p の低下と似た傾向がある。このことから、幅の広いスペクトル形状から、ピーク周波数の低下と共に幅の狭い形状に変移していると言える。

5. 汀線付近における入射長周期波波高と沖合の波の関係

前章では、沖合の波には長周期波成分の存在が無く、一方汀線付近の入射長周期波は3ケース共にスペクトル

図-11 沖波諸量と汀線付近の入射長周期波波高の関係

図-13 汀線付近の入射長周期波算定式 (破線は誤差30%バンド)

形状が似ていることを記した。ここでは、汀線付近における入射長周期波の波高（スペクトルの0次モーメント）と沖合の波の諸量の関係を検討する。図-11は、分離後の入射長周期波の有義波高 $H_{1/3,0}$ と沖合の波の有義波高 $H_{1/3,0}$ 及び平均周期 T_m の関係の実測値とその等値線（Origin ver.6.1）を示したものである。なお、有義波高 $H_{1/3,0}$ 、平均周期 T_m は各地点の波に対し式（3）、（4）の関係をを用いて求めた。

$$H_{1/3} = 4.004 \sqrt{m_0} \dots\dots\dots (3)$$

$$T_m = \frac{m_0}{m_1} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 m_n ：n次モーメントである。有義波高は浅水変形のみ考慮した沖波換算（周期は各地点における平均周期を使用）を行っている。また、解析にあたって、沖合の波の波向きが汀線に対し直角である59度から ± 20 度（図-10下段の点線）に収まる場合のみ使用した。図-11から汀線付近における入射長周期波の波高には沖合の波の波高だけでなく周期も関与していることがわかる。そこで、次元解析的に汀線付近の入射長周期波と沖合の波の波高比 $H_{1/3,0}/H_{1/3,0}$ は、疑似沖波波形勾配 $H_{1/3,0}/gT_m^2$ と関係する

図-12 波高比と疑似沖波波形勾配の関係

と考へて、両者の関係を対数プロットしたものを図-12に示す。図中の曲線は全データに対して最小二乗法により求めたものであり、それを次式の様へ書き直した。

$$H_{1/3,0} = 2.65 \times 10^{-3} \sqrt{gH_{1/3,0}} T_m \dots\dots\dots (5)$$

図-13は式（5）の関係を示したものである。図-13からわかるように、誤差30%の範囲には概ね収まっている。よって、汀線付近の入射長周期波の波高は沖合の波の波高及び周期でほぼ算定できると言えよう。さらに精度の良い関係を得る（ばらつきを抑える）ためには、沖合の波のスペクトル形状（特に幅）、波向きと方向集中度、地形などの考慮が必要であると考へる。

6. 結論

本研究による主要な結論は以下の通りである。

- (1) 複数の水位計を用いる入反射波分離手法は、汀線付近の現地観測データの長周期波に対して適用可能である。
 - (2) 今回の解析結果では、汀線付近における入射長周期波の波高は沖合の波の波高及び周期を用いて、式（5）により誤差30%の範囲で概ね算定可能であった。
- 今後の課題として、今回導いた汀線付近の入射長周期波算定式の物理的意味の解明、入射長周期波の周期さらにスペクトル形を沖合の波と関係付ける事である。

謝辞：本研究で使用している現地観測データの取得に際して、柳嶋慎一さんをはじめとする（独法）港湾空港技術研究所、沿岸土砂管理研究チームの皆様へ多大な協力を頂いた。また、鹿島沖NOWPHASの生データを使用させて頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 関 克己・水口 優 (2004)：自然海浜における長周期波の重複波構造と反射特性，海岸工学論文誌，第51巻，pp.131-135。