

リーフ上のクノイド波の碎波特性

安田孝志*・陸田秀実**・小笠原敏記***・多田彰秀****

1. 緒 言

海岸に来襲する波浪の碎波特性の解明は、依然として海岸工学の中心的課題である。このことは、碎波に関する問題の重要性と同時に難しさを示すものといえる。事実、これまで数多くの研究が行われながら、碎波を特徴づけるジェット生成機構自体が未解明なこともあり、入射波・海底断面諸元と碎波特性の一般的関係は、未だ明らかにされていない。

ここでは、ステップによる水深変化や反射、戻り流れなどの影響を受けるリーフ上のクノイド波の碎波特性を明らかにするため、ステップが1段および2段のリーフにクノイド波を入射させ、2次波峯発生の有無やジェット放出から突入に至る過程での波形変化について実験的に検討する。これを基に、孤立波の場合にその発生が確認された複合型碎波（安田ら、1995）がクノイド波の場合にも同様に生じることを実証するとともに、リーフ上のクノイド波の碎波形式およびジェットサイズと入射波・リーフ諸元の関係についてその一般化を図る。

2. 実験装置と方法

実験は、西松建設(株)技術研究所の片面ガラス張り水槽（ $65\text{m} \times 1\text{m} \times 1.6\text{m}$ ）内に鋼製ユニット構造の1段および2段ステップ（図-1）のリーフを設置し、これにクノイド波を入射させた。リーフの高さは $R_1=26.3\text{cm}$ および $R_2=13.2\text{cm}$ であり、水深 h_1 を 31.0、33.0 および 40.0 cm と変え、リーフの相対天端高 R_1/h_1 を 0.85、0.80 および 0.66 と変化させた。また、入射波の波高水深比 H_1/h_1 を 0.10 から 0.70、無次元周期 $T\sqrt{g/h_1}$ を 10、20 および 30 と変化させ、合計 50 ケースの実験を行った。

ジェット突入までの波形については図-1の測点 W01 から W08 の波高計および高速ビデオカメラ（NAC 製、200 コマ/秒）によって計測し、リーフ法肩での戻り流れの流速を測点 C1 の流速計によって測定した。なお、リーフ手前の3台の波高計（W01～W03）に

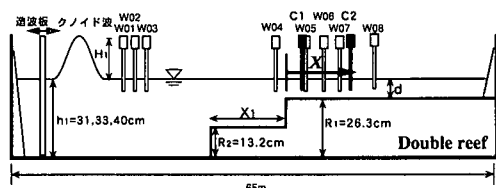


図-1 水槽内の2段リーフと名計機器の設置位置

よる波形データを基に香取ら（1992）の手法を用いて入射波分離を行い、リーフからの反射波やその造波板からの再反射波について検討した。その結果、 $T\sqrt{g/h_1}=30$ を除いて5波目までの波形については再反射波の影響はなく、またリーフからの反射波の影響も無視でき、定常性が保たれていると判断できたため、3～5波目のゼロダウン波高の平均値を入射波の波高 H_1 とした。

このように入射波に定常性が保たれていても、戻り流れなどによる攪乱によって碎波特性が時系列的に微妙に変化した。このため、全ケースからビデオ画像によって碎波波形が時系列的に安定したケースを確認・選別するとともに、4波目の碎波を入射波高 H_1/h_1 に対応するものと扱い、碎波形式やジェットサイズなどを求めた。

3. 碎波形式とその分類

3.1 碎波形式についての考え方

リーフ上の碎波の場合、ジェット放出に至る過程に多様性があり、碎波形式も片野ら（1992）によって指摘された跳車型や二段型だけでなく数多く知られている。著者らは、これらが入射波峯前面での2次波峯の生成と相互干渉に深く関わっているとの観点から、リーフ上のクノイド波の碎波形式を表-1のように整理した。勿論、実際には各碎波形式の中間的な遷移型も多く存在し、また、これら以外の碎波形式もあり得る。しかし、2次波峯の生成とその発達過程に着目すれば、表-2に示すように大きく単峯型と双峯型、さらに干渉の程度によって非、弱および強干渉型に分類できる。これらの中で、干渉によってジェットの規模が増大し、破壊力が増すという点で強干渉型の碎波が重要であり、これに属す碎波を広義の複合型碎波とも呼べる。

* 正 会 員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 正 会 員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科

**** 正 会 員 工修 西松建設(株)技術研究所 技術部海洋技術課

表一 2次波峯に着目したリーフ上のクノイド波の碎波形式

碎波形式	2次波峯	ジェット放出	波峯数	波峯間干渉	碎波の要因	特 徴
I 崩れ波型	無	入射波峯	1	無し	浅水効果	定常波の不安定碎波に近く、波頂点から小規模ジェットの放出
II 巻き波型	有	入射波峯	1	入射波峯と2次波峯の交換後は無し	浅水効果	入射波峯前面から2次波峯が生成され、それが入射波と完全に入れ換わって単一波峯に戻った後、波頂点から中規模のジェットの放出
III 跳水型	有	2次波峯	2	入射波峯と2次波峯の間隔が大きく、干渉は弱い	リーフ法肩からの戻り流れの逆流効果	リーフ法肩からの強い戻り流れによってリーフ手前の波峯前面において跳水状碎波が発生
IV 巻き寄せ波型	有	2次波峯	2	入射波峯と2次波峯の間隔が大きく、干渉は弱い	強い浅水効果	リーフ上に乗り上げた波峯前面から2次波峯が生成され、それが入射波峯と入れ換わる前に未発達のまま波頂付近から中規模のジェットを放出
V 二段型	有	2次波峯に続いて入射波峯	2	入射波峯と2次波峯の間隔が大きく、干渉は弱い	逆流と浅水効果	入射波峯下半面の2次波峯からのジェット放出後、入射波峯からもジェットを放出し、碎波が2段階に進む
VI 突立ち型	有	2次波峯に続いてこれと一体化した入射波峯	2	跳水型の2次波峯と巻き波型の入射波峯との干渉が強く、波峯の一体化が生じて碎波	逆流および浅水効果と波峯間干渉	跳水状態の2次波峯と巻き波状態の入射波峯とがリーフ法肩上で瞬間的に一体化し、巨大な爆発的ジェットを放出
VII 複合型	有	入射波と一体化した2次波峯	2	入射波峯と2次波峯との干渉が強く、波峯の一体化が生じて碎波	浅水効果と波峯間干渉	入射波峯が碎波限界に近づいた段階でその前面から2次波峯が生成され、両者が一体化して発達した2次波峯頂点から巨大なジェットを放出
VIII 二重型	有	入射波峯に続いて2次波峯	2	入射波峯の碎波後に2次波峯との干渉が進み、波峯の一体化が生じて碎波	浅水効果と波峯間干渉	入射波峯の頂点からジェット放出後に2次波峯との一体化が進み、発達した2次波峯の波頂部から大規模ジェットの放出

表二 波峯間干渉に着目した碎波形式の分類

大分類	干渉による分類	従来の分類
単峯型	非干渉型	崩れ波型、巻き波型碎波
双峯型	非干渉型	跳水型碎波
	弱干渉型	二段型、巻き寄せ波型碎波
	強干渉型	突立ち型、複合型、二重型碎波

3.2 碎波形式の代表例

写真一1は、こうして判定した表一の各碎波形式の代表例についてそれぞれの碎波過程を示したものである。

(a) 巻き波型碎波の場合、2次波峯が入射波峯と入れ換わった後に単峯型碎波として波頂点からジェットを放出している。このため、ジェットは波峯間干渉の影響を受けず、その規模も小さい。(b) 巻き寄せ型碎波ではリーフ上で生成された2次波峯が入射波峯と入れ換わる前にジェットを放出し、その後、入射波峯がこれに重なるように碎波している。この場合、弱いながらも入射波峯との干渉があり、2次波峯は発達過程で碎波する。(c) 突立ち型碎波の場合、2次波峯は上段リーフの手前で跳水として生成される。これだけであれば跳水型碎波であり、このときのリーフが1段であればこれに入射波峯の碎波が続く2段碎波となる。しかし、2段リーフの場合、下段リーフによって入射波峯が巻き波型となり、上段リーフ法肩で2次波峯に重なると、両者は強い干渉によって一体化し、波峯前面がほぼ完全に突立つようになる。この後、一体化した波頂部から爆発的に巨大なジェットが放出される。(d) および(e)の複合型碎波の生成過程は孤立波のもの(安田ら、1995)と全く同様であり、下段リーフによって碎波限界に近づいた入射波峯前面から上

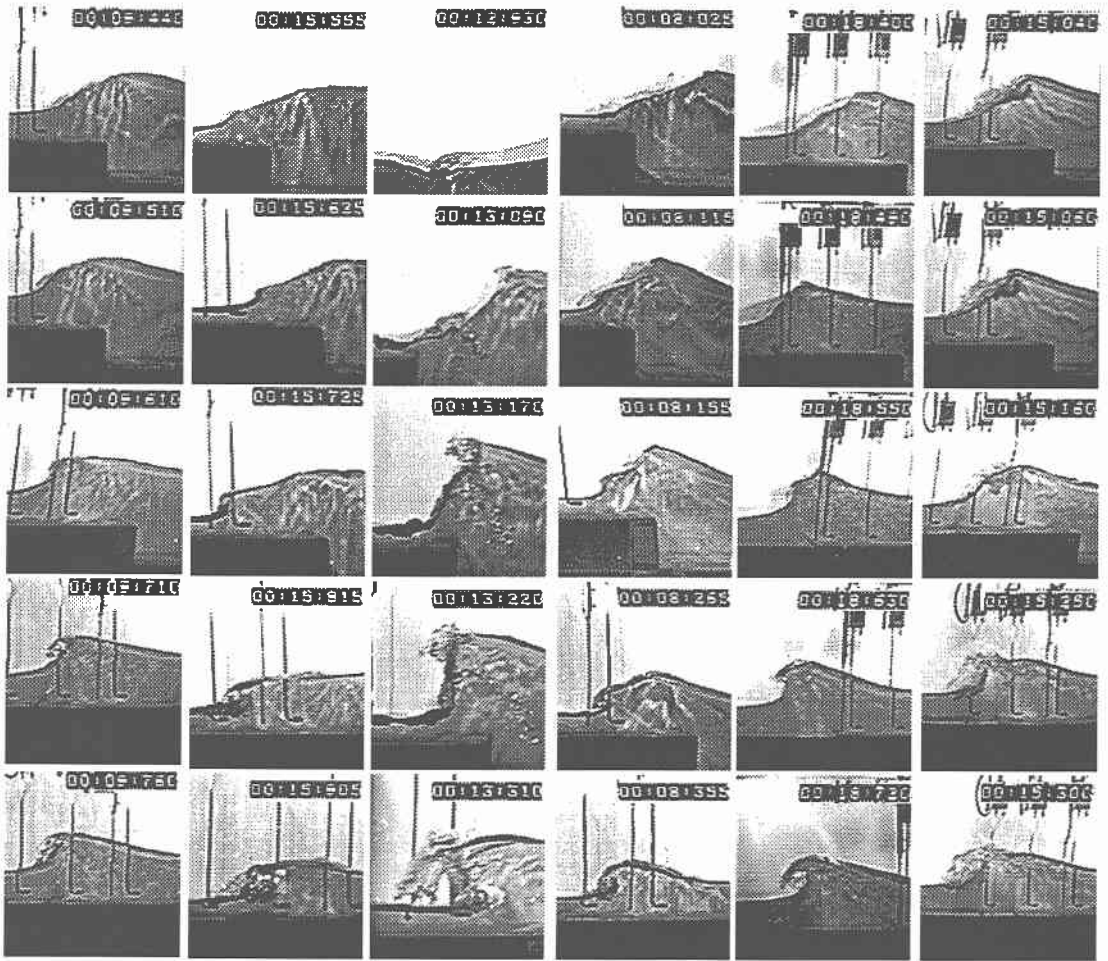
段リーフによって2次波峯が生成され、波峯間に強い干渉が生じて一体化する。このとき、特徴的な三角形の戦冠状波峯が生成され、巨大なジェットが2次波峯の波頂点から放出される。最後の(f)二重型碎波は、下段リーフ長 X_1 が長過ぎ、上段リーフに到達する前に入射波峯からジェットが放出されるが、その後上段リーフ上で生成される2次波峯との一体化によって複合型に準じた碎波となる。この場合、入射波峯のエネルギー損失が軽微であれば、2次波峯との干渉によって、複合型碎波によるものと変わらない。

以上示したように、突立ち、複合および二重型の強干渉型碎波は、入射波の周期に関係なく生じ、2次波峯が碎波限界前後の入射波峯と瞬時の間に強い干渉によって一体化し、強大なジェットを放出する点で共通している。

3.3 碎波形式とジェットサイズの関係

碎波形式は碎波の作用と密接に関わっているが、直接的にはジェットの規模が碎波の作用を支配している。事実、従来の碎波形式の分類は、ジェットの規模や放出点に着目し、碎波形式とジェットの結びつきを暗に仮定している。ここでは、水面への突入直前のジェットに着目し、そのジェットサイズ諸量を図一2のように定め、突入ジェットサイズを $S^*_j = \gamma_{\max} \eta_{\max}$ として定義する。

図一3は、前述の表一に基づいて明瞭に碎波形式の分類ができ、かつ画像データより突入ジェットサイズ S^*_j の解析が可能なケースについて、碎波形式と S^*_j/H^2 の関係を示したものである。これから、各碎波形式の中でも S^*_j/H^2 の値にはバラツキはあるが、図一3の白丸(写真一1の各碎波の S^*_j/H^2 の値を示す)に注目すれば、波峯間干渉が最も顕著となる複合型碎波において S^*_j は極大とな



(a) 巻き波型 (b) 巻き寄せ波型 (c) 突立ち型 (d) 複合型 (e) 複合型 (f) 二重型

写真-1 2段リーフ上のクノイド波の砕波形式の代表例

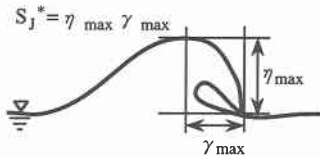


図-2 突入ジェットサイズと記号の定義

り、二重型砕波になると減少に転じることがわかる。これは、各砕波形式に対する S_j^*/H^2 の最小値についても同様に認められる傾向であり、ジェットサイズと砕波形式の間に一定の対応関係があることを裏付けている。したがって、この関係に着目すれば、ジェットサイズによって砕波形式の定量的判定が可能になると考えられる。

4. 1段リーフの場合の砕波特性

入射波が孤立波の場合、リーフの相対天端高 R_1/h_1 の

増加とともに砕波形式は浅水効果によって崩れ波型から巻き波型、さらに巻き寄せ波型に遷移して行く(安田ら, 1996)。これに対し、入射波が周期波の場合、前述したような戻り流れの影響が逆流効果として加わるため、リーフの相対天端高が一定であっても逆流効果によって砕波点だけでなく、砕波形式などの砕波特性も変化する。

写真-2 は、このことを実証するため、 $H_1/h_1=0.33$ の入射波の無次元周期 $T\sqrt{g/h_1}$ を 20 および 30 と変化させたときの $R_1/h_1=0.66$ の 1 段リーフ上の砕波限界時の波形である。 $T\sqrt{g/h_1}=30$ では戻り流れの影響が弱く、典型的な巻き波型砕波になっているが、 $T\sqrt{g/h_1}=20$ では戻り流れの影響が現れ、リーフの天端高を高くした場合に見られる巻き寄せ波型に近い巻き波型砕波となっている。こうした入射波の周期による砕波形式の変化は、波の非線形性の影響もあるが、入射波の短周期化とともに増大する戻り流れの流速によるものと考えられる。

5. 2 段リーフの場合の碎波特性

5.1 下段リーフ長の影響

下段リーフは入射波に浅水効果を加え、入射波が上段リーフに乗り上げる前に碎波限界に近づける役割を担っている。そのため、斜面や逆流などによっても同等の効果を与えることができれば、これらによって下段リーフを代用することも可能である。戻り流れは下段リーフの効果を強めるため、入射波が周期波の場合はその影響がリーフ長に加わることになる。

写真-3 は、 X_1/h_1 を変化させたときの 2 次波峯やジェット生成、放出過程の変化を比較したものである。入射波およびリーフの条件はリーフ長 X_1/h_1 を除いて写真-1(e) のものと同じである。同一条件下の $X_1/h_1 = 5.00$ において複合型が生じていたことから、リーフ長がそれより短い $X_1/h_1 = 3.75$ においては写真-3(a) で示されるように巻き波型から複合型への遷移型碎波となっている。2 次波峯は生成されているが、波峯の交換が進み、入射波峯とほぼ入れ換わった 2 次波峯の頂点からジェットが放出されている。このため、写真-1(e) のジェット放出点は複合型碎波のものより高く、巻き型碎波に近くなっている。これに対し、リーフ長が逆に長い写真-3(b) の $X_1/h_1 = 6.25$ の場合、入射波峯の碎波後に、2 波峯が生成される二重碎波となっている。

このような下段リーフ長 X_1/h_1 の影響を $T\sqrt{g/h_1} = 20$ のクノイド波のジェットサイズについて示したものが図-4 である。戻り流れの流速は入射波の波高天端水深比 H_1/d にも依存するため、 H_1/d の違いによるバラツキはあるが、下段リーフ長 X_1/h_1 の増大とともに S_J^*/H_1^2 の値も増大し、孤立波の場合（安田ら、1995）と同様、複合型碎波の場合に極大となっている。そして、リーフ長がそれを超えると、碎波形式は二重型となり、ジェットサイズも若干減少している。こうしたリーフ長とジェットサイズの関係は、2 次波峯発生タイミングと波峯間干渉の重要性を間接的に示すものといえる。

5.2 入射波周期の影響

碎波形式に直接関わる 2 次波峯の生成や入射波峯との干渉は、入射波高とリーフ諸元だけでは決まらず、入射波の分散性や戻り流れにも影響される。このため、これらに関係する入射波の周期は、碎波形式に大きな影響を及ぼすと考えられる。

図-5 は、前述の表-2 に示した波峯間干渉に基づく碎波形式-非、弱および強干渉型と $T\sqrt{g/h_1}$ の関係を (X_1/h_1) (H_1/d) に関して示したものである。これから、入射波が孤立波から周期波、さらに同じ周期波でもその短周期化に従って、強干渉型碎波の発生領域が大幅に拡大していく。孤立波と $T\sqrt{g/h_1} = 30$ のクノイド波の間で

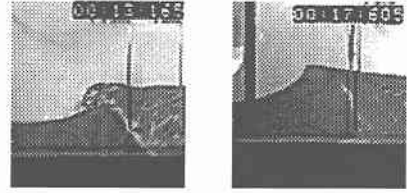


写真-2 入射波周期による碎波限界波形の変化 ($H_1/h_1 = 0.33$, $R_1/h_1 = 0.66$)

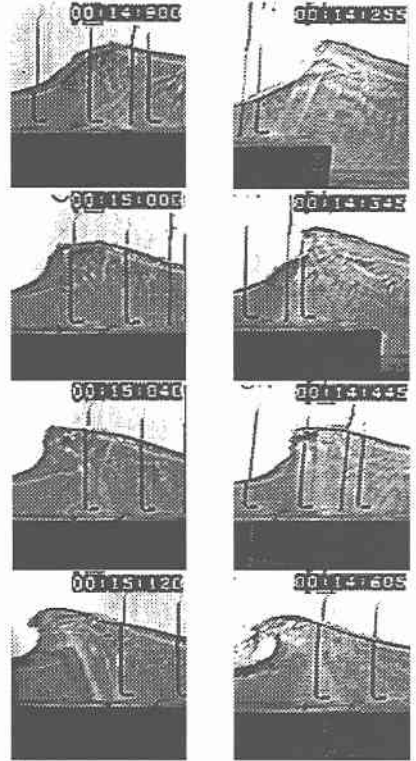


写真-3 下段リーフ長 X_1/h_1 による碎波過程の変化

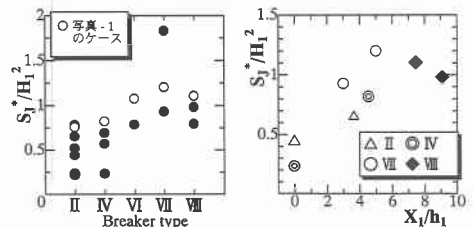


図-3 突入ジェットサイズ S_J^* と碎波形式の関係
図-4 下段リーフ長 X_1/h_1 による突入ジェットサイズ S_J^* と碎波形式の変化

の分散性の相違が小さいことを考えると、両者の発生領域の差異は戻り流れの有無によるものと考えられる。事実、戻り流れの影響が一段と強くなる $T\sqrt{g/h_1} = 10$ およ

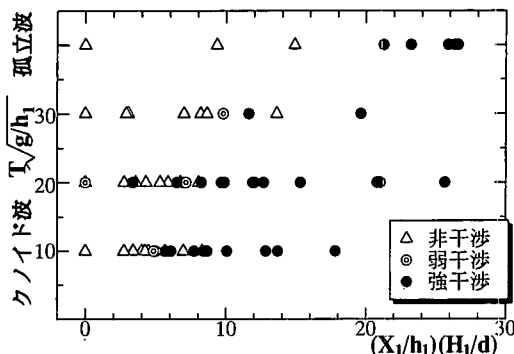


図-5 非、弱および強干渉型の碎波形式の発生領域と $T\sqrt{g/h_1}$ および $(X_1/h_1)(H_1/d)$ の関係

び 20 では発生領域の差異がさらに拡大している。このような短周期化に伴う発生領域の変化は、非干渉型と強干渉型の境界領域となる弱干渉型の発生領域に着目すればより明瞭である。実際に、入射波を $T\sqrt{g/h_1}=10$ のクノイド波とした場合、複合型のような強干渉型碎波を発生させるための下段リーフ長 X_1 を孤立波の場合の $1/4$ 程度まで短縮させることが可能となる。このように、碎波形式が入射波の周期によって大きく変化する事実は、戻り流れの影響の大きさを示すと同時に、リーフ断面の短縮が可能となることを示すものとして重要である。

6. リーフ上のクノイド波の碎波特性と支配因子

これまで示してきたように、リーフ上のクノイド波の碎波形式は戻り流れも加わって複雑かつ多様であるが、入射波およびリーフ諸元に支配される決定系であることは確かである。そこで、これまでの結果を基にして、リーフの影響を表す支配パラメータを ξ_R とし、波の非線形性を表す H_1/h_1 、リーフによる水深の変化率を表す h_1/d および下段リーフによる浅水効果を表す $(1+X_1R_2/h_1^2)$ の積からなる次式を定義する。

$$\xi_R = (H_1/h_1)(h_1/d)(1+X_1R_2/h_1^2) \dots\dots\dots (1)$$

図-6 は、パラメータ ξ_R とジェットサイズ S_f/d^2 の関係を示したものであり、両者に高い相関がある。この結果は、クノイド波の碎波形式は戻り流れなどの影響が加わって複雑となるが、基本的には式 (1) の右辺の因子に支配される決定系であることを実証するものといえる。

前述の図-3 に示したように、ジェットサイズの値と碎波形式の間には相関が認められ、 ξ_R は単にジェットサイズだけでなく、碎波形式の支配パラメータにもなる。図-7 は、このような観点から、遷移型のケースを除いて碎波形式と ξ_R の関係を示したものである。各碎波形式は一定の範囲の ξ_R の値と対応し、その範囲が部分的に重複

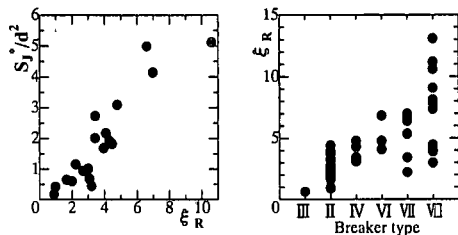


図-6 突入ジェットサイズとパラメータ ξ_R の関係
図-7 碎波形式とパラメータ ξ_R の関係

しているため、 ξ_R の値のみによって碎波形式を一義的に決定することは難しい。しかし、 $\xi_R \geq 8$ では二重碎波のみとなることや、複合型碎波の発生領域が $3 \leq \xi_R \leq 7$ の範囲にあることは容易に読みとることができる。

7. 結 語

リーフ上のクノイド波の碎波形式に対して、2次波峯発生の有無および入射波峯との干渉に着目した分類を行い、これより跳水型から二重型碎波までの碎波が統一的に整理できることを示した。さらに、碎波形式とジェットサイズの間に対応関係があり、波峯間干渉が強くなるに従ってジェットサイズが増大することを見出した。

また、リーフ上のクノイド波の碎波では、リーフによる浅水効果にリーフ法肩からの戻り流れによる逆流効果が加わり、これが碎波形式に大きな影響を及ぼすことを示すとともに、その影響は入射波周期の短周期化に伴って増大することを明らかにした。特に、2段リーフ上の場合、戻り流れによる逆流効果が下段の浅水効果に加わり、巨大なジェットを伴う強干渉型碎波の発生領域が大きく拡大し、 $T\sqrt{g/h_1}=10$ の入射波では孤立波の場合に比べて下段リーフ長を $1/4$ 程度に短縮できることを明らかにした。さらに、1段および2段リーフのクノイド波の碎波形式およびジェットサイズの支配パラメータとして ξ_R を提案し、各碎波形式の発生やジェットサイズの予測を可能にした。最後に、本研究は河川整備基金助成事業によることを付記し、深謝する。

参 考 文 献

- 片野明良・村上信一郎・服部昌太郎 (1992): 幅広滑堤の消波特性の表示システム, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 646-650.
- 香取定和・平良達也・水上優 (1992): 波形追跡法による入射波の分離, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 16-20.
- 安田孝志ほか (1995): 複合型碎波の発見とその発生条件, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 51-55.
- 安田孝志・水谷夏樹・陸田秀実・多田彰秀 (1996): リーフ上の孤立波の碎波形式に及ぼす2次波峯と波峯間干渉の影響, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 76-80.