

潜堤によるトリプル型碎波の発生限界と内部構造に関する 実験的研究

鷺見 浩一*・渋谷 貴志**・細井 寛昭**・岩田好一朗***

1. はじめに

潜堤や人工リーフ等の没水型構造物の築造により、水深が急変するとき、構造物近傍では跳水・二段型碎波(片野ら, 1992)等の特徴的な碎波が生じる。潜堤近傍の碎波に関しては種々の研究がなされ(例えば、滝川ら, 1995; 岩田ら, 1996; 松本ら, 1998), 碎波形式とその発生限界に関してはかなり解明されてきたが、著者らは新たに波 1 周期の間に碎波が 3 度連続して発生する碎波形式(トリプル型碎波と命名)を見出した。また、潜堤周辺域での流速場の内部構造に関する知見は少なく、特に碎波形式の差異による流速場特性と水平渦の空間分布特性については十分に議論されていない。

そこで、本研究では可視化画像計測装置を用いた水理実験を行い、トリプル型碎波の発生限界とその発生要因を、潜堤上での流速場の内部構造と水深急深に伴い発生する反射波に関連づけて検討し、さらにトリプル型碎波の定常流場、定常渦分布、乱れ特性を他の碎波形式と比較しながら考究しようとするものである。

2. 実験装置の概要と解析方法

実験は名古屋大学工学部の反射吸収制御装置を備えた 2 次元造波水槽(長さ 30 m, 幅 0.7 m, 高さ 0.9 m)を用いて、水深 $h=40$ cm の水平固定床の上に不透過矩形型潜堤を設置して行った。本研究では、トリプル型碎波の発生限界の提示を目的とする実験 I と可視化計測装置を用いて碎波形式の相違による流速場の内部構造を解明する実験 II の 2 種類の水理実験を行った。不透過矩形潜堤は堤幅 $B=60$ (実験 I), 80 (実験 I, II) cm, 堤高 $D=32$ cm (実験 I, II), 天端水深 $R=8$ cm (実験 I, II) とした。実験波は、実験 I では入射波高を $H_I=5.0\sim13.0$ cm (1 cm 間隔) とし、周期を $T=1.68, 1.86, 2.15, 2.42$ s の 4 種類として合計 27 種類の規則波を作用させた。実験 II では $H_I=6.0$ cm に対して $T=2.15, 1.68$ s の 2 種類

と $H_I=4.0$ cm, $T=1.2$ s の合計 3 種類の規則波とした。この波を堤体に造波させた場合、潜堤天端上での碎波形式はそれぞれトリプル型碎波、Plunging 型碎波、S-P 型碎波となる。なお、S-P 型碎波とは、Spilling 型と Plunging 型の中間の性質を持つ碎波形式である。

測定項目は、潜堤周辺の水位変動、碎波形式、流速分布である。水位の測定は、図-1 に示すように入射波測定用に造波板から 5 m の位置と、反射率測定用に潜堤沖側端部から沖方向へ 1/4 波長と 1/2 波長の 2 地点、および透過波測定用に潜堤岸側端部から岸方向へ 1/4 波長の合計 4 地点にそれぞれ電気容量式水位計を設置して行った。併せて碎波状況を 8 mm ビデオカメラにより録画観測した。なお、反射率の算定には合田 (1997) らによる入反射分離法を採用した。

潜堤周辺の流速場の測定には、水中に粒子(ナイロン 12, 中央粒径 $d_m=50\text{ }\mu\text{m}$)を注入するトレーサー法を用い、水路側方のハイスピードビデオカメラ(撮影時間間隔 $\Delta t=1/15$ s)により可視化画像を撮影した。この画像から流速場を算定するアルゴリズムとして、微小時刻差 (950 μs) の 2 枚の瞬間画像を PC に取り込み相関関係を用いて、粒子同士を対応づける PIV 法(江藤ら, 1990)を採用し、潜堤周辺の詳細な流速場を計測した。

後述するエネルギー逸散率、水平渦度、乱れ強度、レイノルズ応力は、それぞれ式 (1), (2), (3) を用いて算出した。また、FFT 法によりスペクトル解析を行った。碎波によるエネルギーの消散の程度を示すエネルギー逸散率 K_{loss} は式 (1) で定義される。

$$K_{\text{loss}} = \sqrt{1 - (K_R^2 + K_T^2)} \dots\dots\dots (1)$$

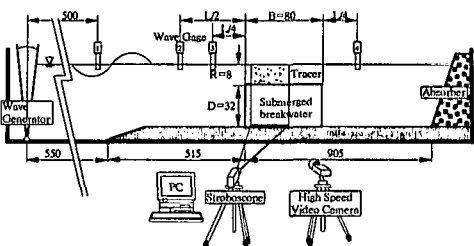


図-1 実験装置概要 (単位: cm)

* 正 会 員 博(工) 名古屋大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻
** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻
*** フェロー 工 博 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

ここに、 K_R は反射率、 K_T は透過率である。潜堤沖側端部の海底面を原点と定め、水平座標を X 軸に、鉛直座標を Z 軸とすると水平渦度 ω_y は式(2)で与えられる。 ω_y を算定するにあたっては、PIV法から得た流速値に式(2)を中心差分で離散化した差分方程式を適用した。

$$\omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 u 、 w はそれぞれ X 、 Z 方向の流速である。

任意の1点における瞬間流速 U を平均流速 $\bar{U}$ と時間的に不規則な変動をする u' からなるとすると、 X 方向の流速変動は $u' = U - \bar{U}$ であり、乱れ強度は次式で定義される。

$$\sqrt{\bar{u'^2}} = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T u'^2 dt \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

また、平均運動量の輸送に寄与するせん断応力であるレイノルズ応力は $\tau = -\rho \overline{u'w'}$ で与えられる。ここに、 ρ は水の密度である。

3. トリプル型砕波の砕波特性

3.1 トリプル型砕波

本研究で新たに見出したトリプル型砕波は、まず図-2(a)にあるように潜堤沖側前面で戻り流れと入射波の衝突による弱い落ち込み型砕波が生じる。その後、波の伝播に伴って潜堤上で波頂部が岸側方向に崩れて2度目の砕波が発生する(図-2(b))。さらに、図-2(c)、(d)に示すように、潜堤岸側端部での水深急深に伴う反射波により波峰背面部の水表面が隆起し、その内部に気泡を取り込み、沖方向に碎ける3度目の砕波が起こる連続型砕波である。

3度目の砕波のように反射波の進行方向に水表面が碎ける砕波形態を、岩田ら(1983)は反射進行波型砕波としている。反射進行波型砕波は、反射波が入射波より大きいときに発生するといわれている。なお、図-2(c)は3度目の砕波発生時の可視化画像であり、図-2(d)は3度目の砕波発生から0.2秒後の可視化画像を示している。この0.2秒間に気泡混入域は徐々に拡大し、移流している。気泡混入域では、後述の4.2節において循環流の発生を確認し、この循環流の移流と気泡混入域の移動はほぼ対応し、かつ3度目の砕波発生よりも若干速く循環流は形成されている。

3.2 トリプル型砕波の砕波限界

図-3は実験Iから得た潜堤によるトリプル型砕波の砕波限界を H_i/R と B/L_i により示したものである。図からトリプル型砕波は B/L_i と H_i/R に大きく支配され、 $B/L_i \cong 0.17$ では $0.9 \leq H_i/R < 2.0$ の範囲でトリプル型砕波が発生し、 B/L_i が大きくなるにつれて砕波限界を与える H_i/R は2.0から小さくなり、 $B/L_i \geq 0.3$ になると天

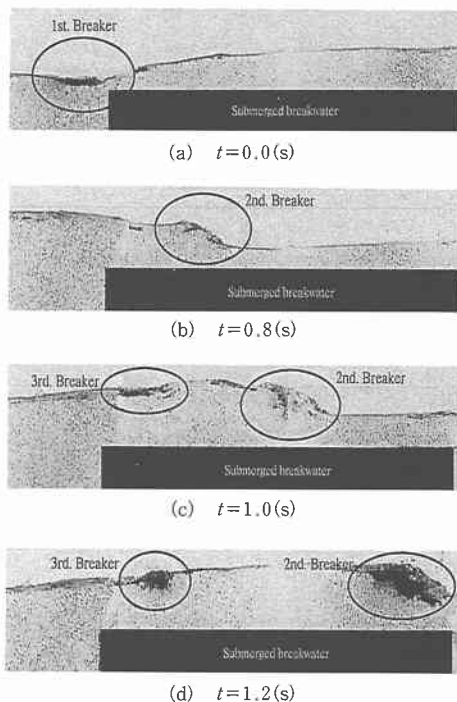


図-2 可視画像によるトリプル型砕波

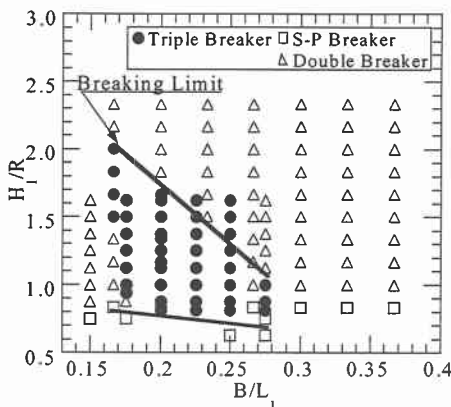


図-3 トリプル型砕波の砕波限界

端水深の約0.8~2.3倍の波高に対しても発生しなくなる。すなわち、潜堤天端幅に比して相対的に波長が大きい場合にトリプル型砕波は発生しやすいが、逆に波長が短く波高が大きくなると発生しにくい傾向となる。

3.3 エネルギー逸散率

エネルギーの消散は潜堤天端上で発生する砕波の形式や規模によって異なる。そこで、トリプル型砕波、Plunging型砕波、S-P型砕波の反射率 K_R 、透過率 K_T 、エネルギー逸散率 K_{loss} の特性を検討する。表-1は実験IIで得られた砕波形式が異なる場合の K_T 、 K_R 、 K_{loss} の値を示している。トリプル型砕波のエネルギー逸散率は、他の砕

表一 砕波形成の差異による反射率, 透過率, エネルギー逸散率

砕波形式	K_T	K_R	K_{loss}
トリプル型砕波	0.495	0.398	0.772
Plunging 型砕波	0.495	0.445	0.746
S-P 型砕波	0.623	0.202	0.756

波形式と比較して最も大きく、効果的に波動エネルギーを消散することを示している。また、トリプル型砕波の K_T は、Plunging 型砕波と同じであるが、 K_R は Plunging 型砕波よりも小さい値となっている。

入射波高が一定の場合に所要の K_T を得ようとするとき、トリプル型砕波を発生させることで K_R を Plunging 型砕波より小さくすることが可能であり、背後域の静穏化のみならず前面海域においても波浪を制御できることを示している。

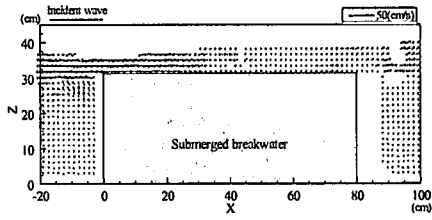
4. 流速分布

4.1 トリプル型砕波の流速分布

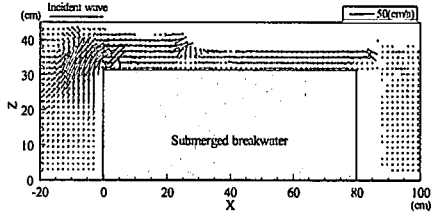
図一4(a)～(d) は実験IIから得たトリプル型砕波内部の流速ベクトル分布であり、(a)～(d)はそれぞれ図一2に示した可視化画像に対応した時刻のものとなっている。

図一4(a) はトリプル型砕波の1度目の砕波である落ち込み型砕波が生じた瞬間の流速ベクトルである。0≦X≦40 cm の潜堤上で強い戻り流れが発生し、潜堤沖側隅角部ではこの戻り流れに連行されるように上昇流が発生している。図一4(b) は2度目の砕波時の流速ベクトルを示している。波頂部は潜堤上の X=25 cm 付近まで伝播しており、沖側隅角部では、X<0 cm の沖側領域から天端上に流入する強い流れが確認できる。また、沖側端部付近の天端上では弱い循環流が生じている。図一4(c) は3度目の砕波発生時の流速ベクトルを示している。波頂部は潜堤上の X=50 cm 付近まで伝播しており、波峰部分と沖側隅角部において大きい流速値を持つ流れが生じている。また、図一2(c)において3度目の砕波が発生し気泡が混入していた領域の天端面近傍では、循環流が発生している。図一4(d) は3度目の砕波が生じてから0.2秒後の流速ベクトルを示している。図一4(c)で生じていた循環流の中心部は、0.2秒の間に X=10 cm から X=15 cm 付近まで岸方向へ移流し、その規模は大きくなっている。また、図一2(c) と図一2(d) の比較から、図一2(d) では図一2(c) よりも気泡の混入する領域は拡大し、岸方向へ移動していることが確認できる。

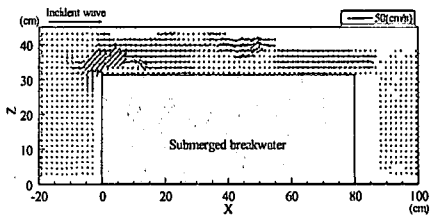
このように、3度目の砕波の気泡混入領域と循環流の発生領域はほぼ一致しており、トリプル型砕波における3段階砕波の発生要因の一つに、流速場の内部構造が考



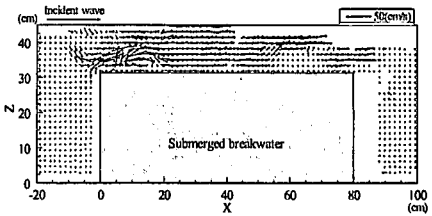
(a) t=0.0(s)



(b) t=0.8(s)



(c) t=1.0(s)



(d) t=1.2(s)

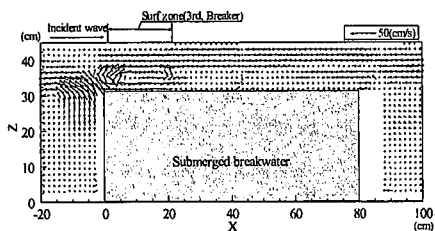
図一4 トリプル型砕波の流速ベクトル

えられる。そこで、4.2節ではトリプル型砕波と他の砕波形式の流速場構造の比較を行い、トリプル型砕波の流速場特性を検討する。

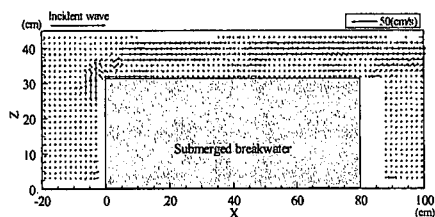
4.2 砕波形式の差異による流速分布

図一5(a), (b), (c)は、砕波形式が異なる場合の定常流ベクトルを示しており、砕波形式はそれぞれ(a)がトリプル型砕波、(b)がPlunging型砕波、(c)がS-P型砕波である。

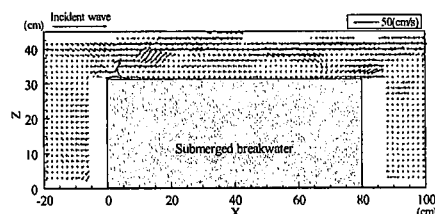
3つのケースを比較すると定常流流速はトリプル型砕波が最も大きい値を示している。特に潜堤の沖側端部では最大流速が生じ、循環流が形成されている。また、循環流が形成されている範囲は、図一4(c) と図一4(d) の循環流が移流した範囲に相当し、図一2の可視化画像で3度目の砕波が気泡を混入していた領域である。なお、



(a) トリプル型碎波

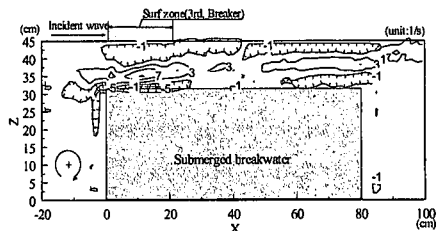


(b) Plunging 型碎波

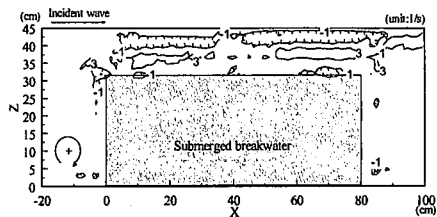


(c) S-P 型碎波

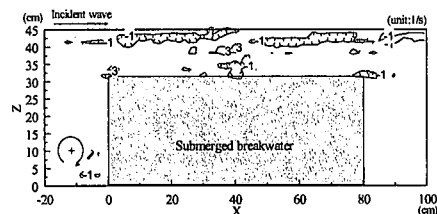
図-5 碎波形式の差異による定常流ベクトル



(a) トリプル型碎波



(b) Plunging 型碎波



(c) S-P 型碎波

図-6 碎波形式の差異による定常渦

Plunging 型碎波と S-P 型碎波ではこのような循環流の発生は確認できず、3 度目の碎波の発生には、流速場の内部構造が関係していると推察される。また、水表面から天端水深中央部付近までは岸向きの定常流が卓越し、天端水深中央部付近から天端面までは冲向きの流れが発生している。この流れは碎波に伴う岸向きの質量輸送を補償する流れと考えられる。Plunging 型碎波と S-P 型碎波でもこの質量輸送流れとそれを補償する冲向き流れは生じており、水表面付近で岸向きの最大流速が生じ、冲向きの補償流は天端上で小さい流速となっている。

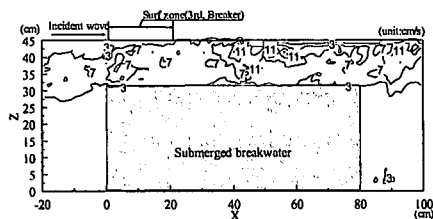
5. 定常渦

図-6(a), (b), (c) はそれぞれトリプル型碎波, Plunging 型碎波, S-P 型碎波の定常渦を示しており、定常渦の算定には図-5(a), (b), (c) の定常流を用いた。なお、渦度は時計回りを正とする。3 つのケースを比較すると、トリプル型碎波では時計回りの高渦度域が 3 段目碎波発生域の $0 \leq X \leq 20$ cm に存在し、水表面近傍に反時計回りの渦領域が細長い帯状となって天端面全域に広がっており、潜堤隅角部周辺で時計回りの渦と水表面で反時計回りの渦の残留が確認できる。Plunging 型碎波と S-P 型

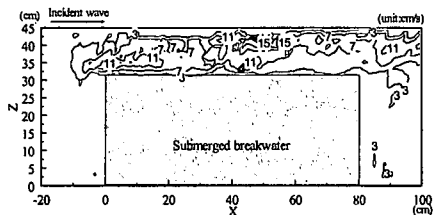
碎波では高渦度域は認められない。全ケースに水表面近傍に反時計回りの渦領域が細長い帯状となって広がっている。また、トリプル型碎波では、沖側隅角部付近で回転方向が互いに異なる渦が交互に並ぶ渦列となっている。

7. 乱れ特性

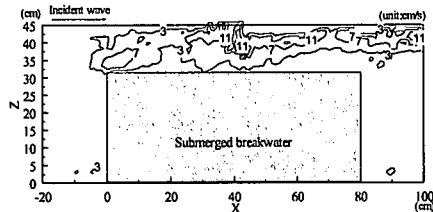
図-7(a), (b), (c) は潜堤周辺での乱れ強度の分布を示し、碎波形式はそれぞれトリプル型碎波, Plunging 型碎波, S-P 型碎波である。全ケースに共通して、乱れ強度は水表面近傍で大きい値を示すが、水深が底面に近づくにつれ小さくなる。また、乱れのピークは $35 \leq X \leq 45$ cm, $35 \leq Z \leq 40$ cm の領域で現れている。 $X < 0$ cm の潜堤前面域では、トリプル型碎波と Plunging 型碎波において乱れが出現する領域が認められ、トリプル型碎波が最も広範囲である。S-P 型碎波ではこのような傾向は見られない。 $X > 80$ cm の潜堤背後域では全ケースにおいて $Z \geq 30$ cm の領域で、乱れ強度の出現が確認でき、トリプル型碎波が最も広範囲で大きい値を示している。このことは、前述のエネルギー逸散率が最も大きかったことを示唆し、物質の輸送・混合が活発に行われることを示し



(a) トリプル型砕波

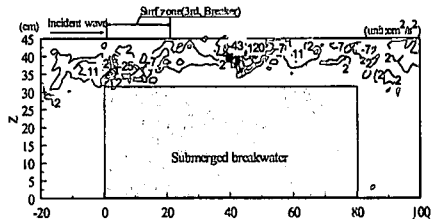


(b) Plunging 型砕波

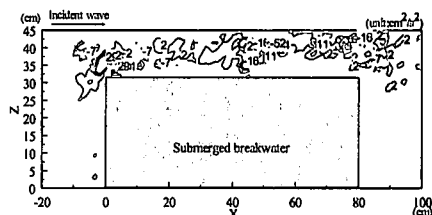


(c) S-P 型砕波

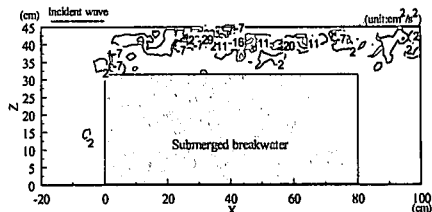
図-7 砕波形式の差異による乱れ強度



(a) トリプル型砕波



(b) Plunging 型砕波



(c) S-P 型砕波

図-8 砕波形式の差異によるレイノルズ応力

ている。

レイノルズ応力は対称テンソルであり、このうち平均運動量輸送への寄与が大きい対角成分を式(5)により算定し、その結果を図-8に示した。図-8(a), (b), (c)の砕波形式は、それぞれトリプル型砕波、Plunging型砕波、S-P型砕波である。レイノルズ応力は乱れの生成と関係しており、レイノルズ応力の大きいところでは乱れの発生も大きいので、図-7と図-8の分布が類似しているのは当然といえる。図-8において、トリプル型砕波とPlunging型砕波の沖側隅角部のレイノルズ応力の符号が互いに異なり、トリプル型砕波では負、Plunging型砕波では正となっている。すなわち、正の相関の場合はX方向とZ方向の変動速度成分が時間的に同じ動きをし、負の場合には逆の向きの変化をすることを示している。変動速度成分がこのような相関を持つ場合、渦塊は平均流からエネルギーを引き出しやすいレイノルズ応力の構造と考えられ、効果的に波エネルギーを消散させると推察される。

7. おわりに

本研究では、水理実験を行いトリプル型砕波の砕波限界とその流速場を検討した。トリプル型砕波の砕波限界

の支配的なパラメータは H_i/R と B/L_i であり、 B/L_i が小さく H_i/R が大きいほどトリプル型砕波は発生しやすい傾向を示した。また、トリプル型砕波のエネルギー逸散率は、他の砕波形式よりも大きく効果的に波動エネルギーを消散させることがわかった。流速場の内部構造においてはトリプル型砕波のみに、天端上に循環流が形成されたことから、3度目の砕波発生要因の一つに流速場の内部構造が影響していると推察される。

最後に本研究は科学研究費(基盤(B)(1)、研究代表者 岩田好一郎)により行われたことを付記する。

参考文献

- 岩田好一郎・清野 博 (1983): 不規則重複波の砕波に関する研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 99-103.
- 岩田好一郎・川崎浩司・安藤敏宏 (1996): 潜堤による砕波特性とその内部機構に及ぼす波と潜堤の幾何スケール比, 海溝開発論文集, Vol. 12, pp. 297-302.
- 江藤剛治・竹原幸生 (1990): 多数のトレーサ粒子の自動追跡のための新しいアルゴリズムの開発, 水工学論文集, 第34巻, pp. 689-694.
- 合田良実 (1997): 港湾構造物の耐波設計, pp. 258-264.
- 滝川 清・山田文彦・松本健作 (1995): 潜堤上砕波変形の内部特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 66-70.
- 松本健作・滝川 清・山田文彦・島津秀一 (1998): 潜堤上砕波の分類とその内部特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 101-105.