

潜堤周辺で発生する渦の時空間分布 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON TIME AND SPACE DISTRIBUTION VORTICES GENERATED AROUND SUBMERGED BREAKWATER

鷲見 浩一¹・渋谷 貴志²・細井 寛昭²・岩田 好一朗³

Hirokazu SUMI, Takashi SHIBUYA, Hiroaki HOSOI, and Koichiro IWATA

¹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 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (同上)

³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 (同上)

This study investigates the characteristics of the vortex and the velocity field around a submerged breakwater utilizing flow visualization by PIV technique. From experimental observation, it is found that the Triple type breaking causes energy higher rate dissipation than the Plunging breaking. In addition, the steady vortex is generated at seaward edge of the submerged breakwater in case of the Triple type breaking. That is, the structural vortex on the crown strongly depends on the breaker type.

Key Words : Submerged breakwater, vorticity, steady flow, wave breaking

1. はじめに

従来から矩形型潜堤の設置に伴って生じる碎波に関しては種々の研究が行われており、滝川¹⁾らは碎波形式の分類と流れの可視化システムを用いて潜堤隅角部の流速場特性を実験的に検討している。また、岩田²⁾らは潜堤の断面形状と入射波諸元による碎波形式の分類を系統的に行っている。矩形型潜堤による碎波の内部構造を解明しようとする場合、碎波フロントの伝達による渦と流速場の時空間変動および乱れの発達を検討しなければならず、これには碎波帯を含む潜堤周辺の広範囲における計測が必要である。しかし、これまでに潜堤全域を含む広範囲での、碎波形式が異なる場合の可視化手法による知見は少なく、流速場の内部構造と乱れに関しては不明な点が多い。

そこで本研究では、流れの可視化画像処理システムを用いて水理実験を実施し、碎波形式の差異による水平渦の空間分布特性、流速場特性、乱れとエネルギー逸散の関係について考究する。

えた2次元造波水槽(長さ25m,幅0.7m,高さ0.9m)を用いて、水深 $h=40\text{cm}$ の水平固定床上に不透過矩形型潜堤を設置して行った。不透過矩形潜堤は堤幅 $B=80\text{cm}$,堤高 $D=32\text{cm}$,天端水深 $R=8\text{cm}$ とした。作用波浪は表-1に示すように3種類の規則波であり、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ケース1からそれぞれTriple型碎波、Plunging型碎波、S-P型碎波となる。なお、Triple型碎波とは、まず潜堤沖側前面で戻り流れと入射波の衝突による落ち込み碎波が生じ、その後、波の伝播に伴って天端上で波頂部が岸側方向に崩れて2度目の碎波が発生する。さらに潜堤岸側端部からの反射波により波峰背面部の水表面が隆起し、その一部の小水塊が沖方向へ飛び出して3度目の碎波が起こる連続型碎波である。また、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。

表-1 作用波浪

ケースNo.	$H_1(\text{cm})$	$T(\text{s})$	碎波形式
1	6	2.15	Triple型碎波
2	6	1.68	Plunging型碎波
3	4	1.2	S-P型碎波

2. 水理実験の概要と解析方法

実験は名古屋大学工学部の反射吸収制御装置を備

測定項目は、潜堤周辺の水位変動と流速分布である。水位の測定には、入射波測定用に造波板から

5m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水位変動を計測した。なお、反射率の算定には合田³⁾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 $d_m=50\mu m$)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 $\Delta t=15H_2$)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、微少時刻差(950 μs)の2枚の瞬間画像から相関関係を用いて、粒子同士を対応づけるPIV法(江藤ら³⁾)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),(4),(5)を用いて算出した。

砕波によるエネルギーの消散の度合いを示すエネルギー逸散率 K_{loss} は次式で定義される。

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

ここに、 K_R は反射率、 K_T は透過率である。

水平渦度 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。

$$\omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \tag{2}$$

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 $\bar{U}$ と時間的に不規則に変動する u' からなるとすると、 X 方向の変動流速は

$$u' = U - \bar{U} \tag{3}$$

であり、乱れ強度は次式で定義される。

$$\sqrt{u'^2} = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T u'^2 dt \right\}^{1/2} \tag{4}$$

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次式で与えられる。

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} \tag{5}$$

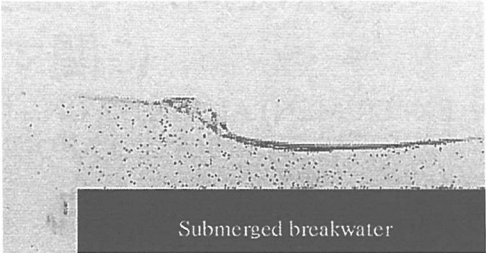
ここに、 ρ は水の密度である。また、レイノルズ応力は ρ を省略して $\overline{u'w'}$ と表せられることもあり、本論でもこの表記法に従うことにする。

3. 砕波特性

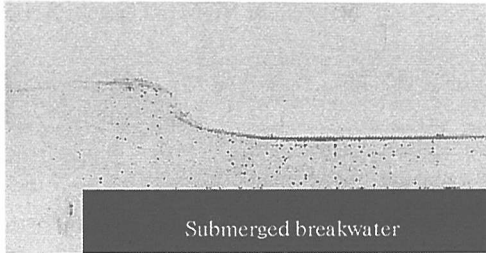
(1) 可視化画像による潜堤天端上での砕波

図-1の(a)~(c)はそれぞれケース1~3の潜堤天端上での砕波時を撮影した可視化画像である。図-1(a)では波形が波峰の前後において非対称となり、波の前面勾配が後面と比較して急となっているTriple型の2度目の砕波である。図-1(b)はPlunging型砕波であり、波峰に対する波形の非対称性が大きく、波の前面から前方に跳び出す水塊が確認できる。図-1(c)は波峰

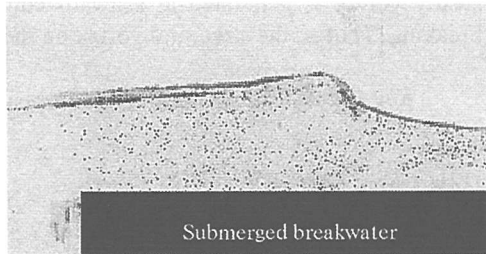
の波形が前後において非対称となり、波面前面を巻き込むように崩れるS-P型砕波である。



(a) ケース1(Triple型砕波)



(b) ケース2(Plunging型砕波)



(c) ケース3(S-P型砕波)

図-1 可視化画像による潜堤天端上での砕波

(2) 砕波形式の差異によるエネルギー逸散率

矩形型潜堤に波が入射すると、入射波エネルギーの一部は反射され沖方向に、また一部は透過波エネルギーとなって岸方向へ進行し、残りの波動エネルギーの大部分は強制砕波および天端面との摩擦等により消散する。この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。ここでは、Triple型砕波、Plunging型、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-2 砕波形式の差異による反射率、透過率、エネルギー逸散率

ケースNo.	K_T	K_R	K_{loss}
1	0.495	0.398	0.772
2	0.495	0.445	0.746
3	0.623	0.202	0.756

表-2はケース1~3の砕波形式の K_T 、 K_R 、 K_{loss} の解析結果を示している。ケース1(Triple型砕波)の K_T は、ケース2(Plunging型砕波)と同じであるが、 K_R はケース2(Plunging型砕波)よりも小さい値となっている。これは、入射波高が一定の場合、潜堤により所要の

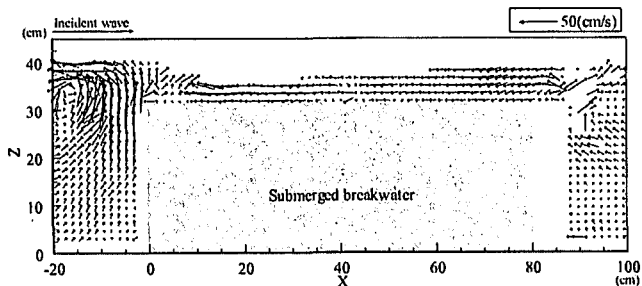
K_T を得ようとするとき、Triple型碎波を発生させることで K_R もPlunging型碎波より小さくすることが可能であり、背後域の静穏化のみならず前面海域においても波浪の散乱を制御できることを示している。

4. 流速分布

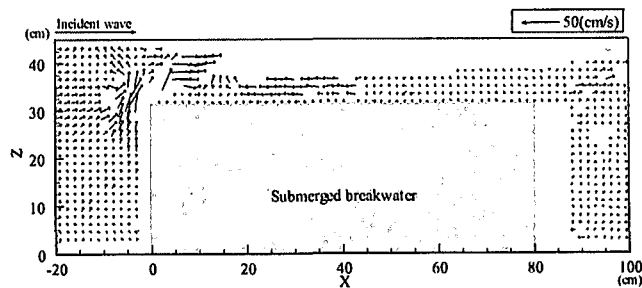
(1) 流速分布

図-2～図-4はPIV法により算出した潜堤周辺域での流速ベクトル分布を示している。

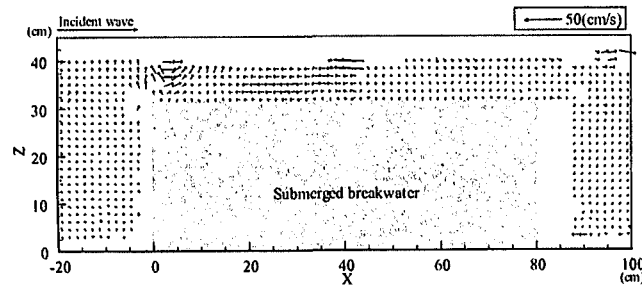
図-2は入射波の波頂部が潜堤沖側隅角部($X=0.0\text{cm}$)に到達した瞬間の流速分布ベクトルであり、(a),(b),(c)はそれぞれケース1,2,3の碎波形式に対応している。沖側隅角部の入射方向流速はPlunging型碎波が最も速い流速となっている。ケース1(Triple型碎波)では潜堤沖側端部で上昇流が発生し、水表面付近で流向が沖方向へ変化する流れが発生している。碎波形式がS-P型碎波となるケース3においても上昇流が発生しているがケース1ほど明瞭ではない。碎波形式がPlunging型となるケース2において



(a) ケース1(Triple型碎波)



(b) ケース2(Plunging型碎波)

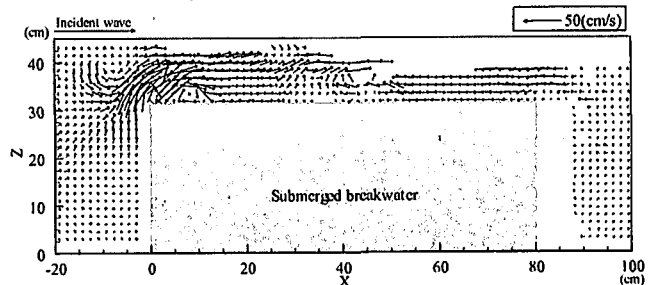


(c) ケース3(S-P型碎波)

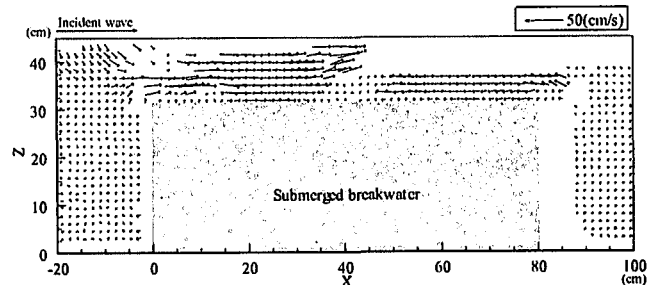
図-2 波が沖側端部に入射した瞬間の流速ベクトル

もこのような上昇流が見られ、 $0 \leq X \leq 15(\text{cm})$ の天端上で岸側へ向かう大きな流速が発生している。また、各ケースに共通して天端上で入射波と戻り流れの衝突が確認できる。

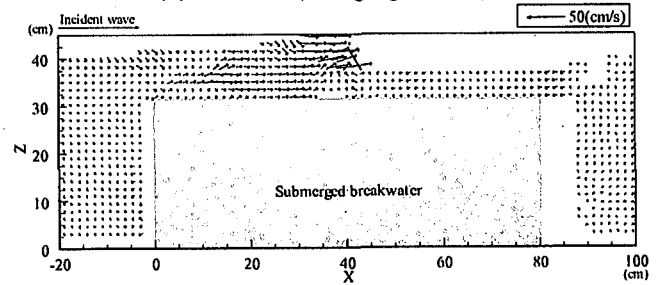
図-3は波頂部が潜堤中央部($X=40.0\text{cm}$)付近に伝播した瞬間の流速ベクトル分布であり、(a),(b),(c)はそれぞれケース1,2,3の碎波形式に対応している。ケース1では沖側隅角部付近に循環流が形成され、沖側海域から天端上に速い流れが流入し、 $X=40(\text{cm})$ 付近の流速よりも速い値を示している。ケース2と3ではこのような循環流は発生せず、波峰付近で最大流速が発生している。このことから、天端上での循環流発生の有無は碎波形式の相違によるものと考えられる。



(a) ケース1(Triple型碎波)



(b) ケース2(Plunging型碎波)



(c) ケース3(S-P型碎波)

図-3 波が天端中央に伝播した瞬間の流速ベクトル

図-4はケース1(Triple型碎波)の入射波の波頂部が潜堤背後域($X=100\text{cm}$)付近に達したときの瞬間流速分布である。なお、図-3(a)からは約0.47s後の時刻となる。図-4と図-3(a)を比較すると循環流の中心部が約0.47s間に $X=10\text{cm}$ から $X=20\text{cm}$ 付近まで岸方向に移流している。このような循環流の移流が確認できたのはケース1(Triple型碎波)のみであり、他の碎波形式では、循環流の発生と移流は確認できなかった。

したがって、天端上での発生する循環流の有無とその移流には、砕波形式の違いが関係していると考えられる。

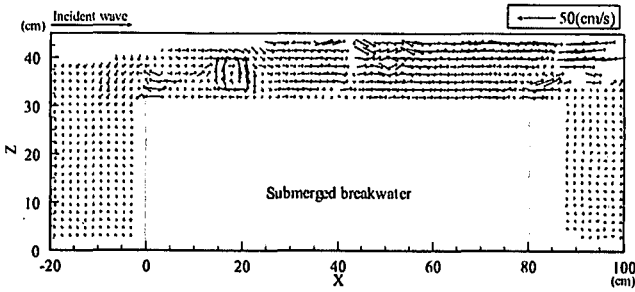
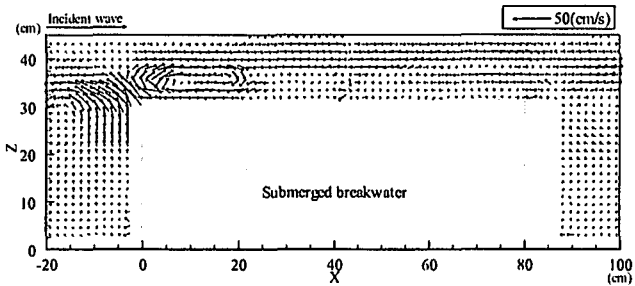


図-4 潜堤周辺での瞬間流速ベクトル

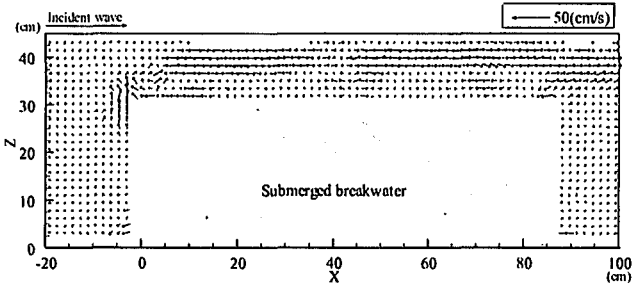
(2) 定常流分布

図-5(a),(b),(c)はそれぞれケース1,2,3の潜堤周辺での定常流を示している。

3つのケースを比較すると定常流流速はケース1が最も大きい値を示しており、殊に、潜堤の沖側端部では最も速い流速が生じ、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-3(a)と図-4の循環流が移流した範囲に相当している。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。この流れは砕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。ケース2およびケース3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。

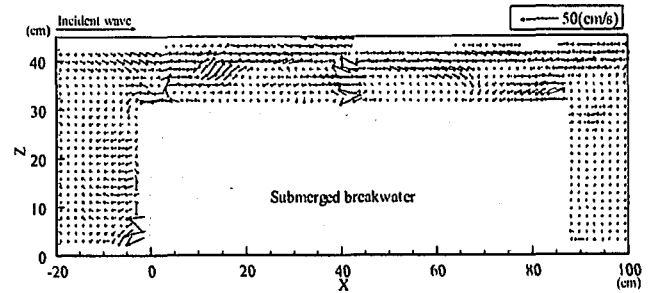


(a) ケース1(Triple型砕波)



(b) ケース2(Plunging型砕波)

図-5 潜堤周辺での定常流

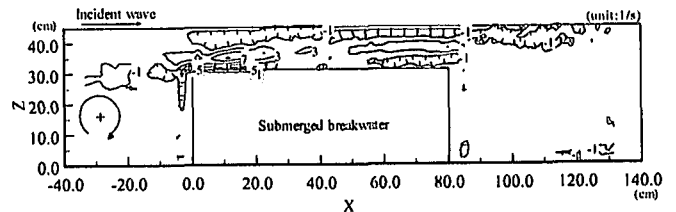


(c) ケース3(S-P型砕波)

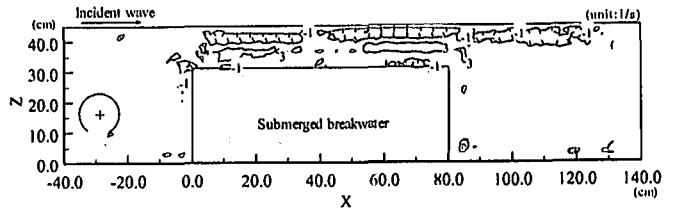
図-5 潜堤周辺での定常流

5. 定常渦

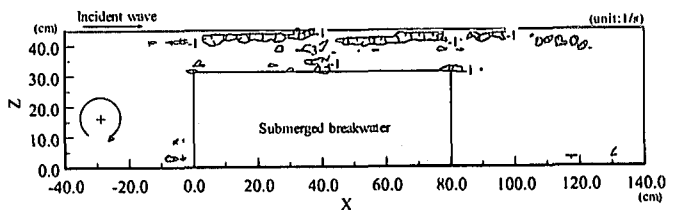
図-6(a),(b),(c)はそれぞれケース1,2,3の定常渦を示しており、定常渦の算定に図-5(a),(b),(c)の定常流を用いた。なお、渦度は時計回りを正とする。3つのケースを比較すると、ケース1では時計回りの高渦度域が沖側潜堤隅角部に広範囲に存在し、水表面近傍に反時計回りの渦領域が細長い帯状となって天端面全域に広がっており、潜堤隅各部周辺で時計回りの渦と水表面で反時計回りの渦の残留が確認できる。ケース2と3では高渦度域は認められないが、ケース2ではZ=35(cm)付近の天端上に時計回りの渦度が存在している。全ケースに水表面近傍に反時計回りの渦領域が細長い帯状となって広がっている。また、ケース1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。



(a) ケース1(Triple型砕波)



(b) ケース2(Plunging形砕波)



(c) ケース3(S-P型砕波)

図-6 潜堤周辺の定常渦

6. 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、それぞれケース1,2,3の碎波形式に相当している。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 $35 \leq X \leq 45(\text{cm})$, $35 \leq Z \leq 40(\text{cm})$ の領域で現れている。 $X < 0(\text{cm})$ の潜堤前面域では、ケース1において乱れが出現する領域が認められるが、ケース2と3ではこのような傾向は見受けられない。 $X > 80(\text{cm})$ の潜堤背後域では全ケースにおいて $Z \geq 30(\text{cm})$ の領域で、乱れ強度の出現が確認でき、ケース1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ている。

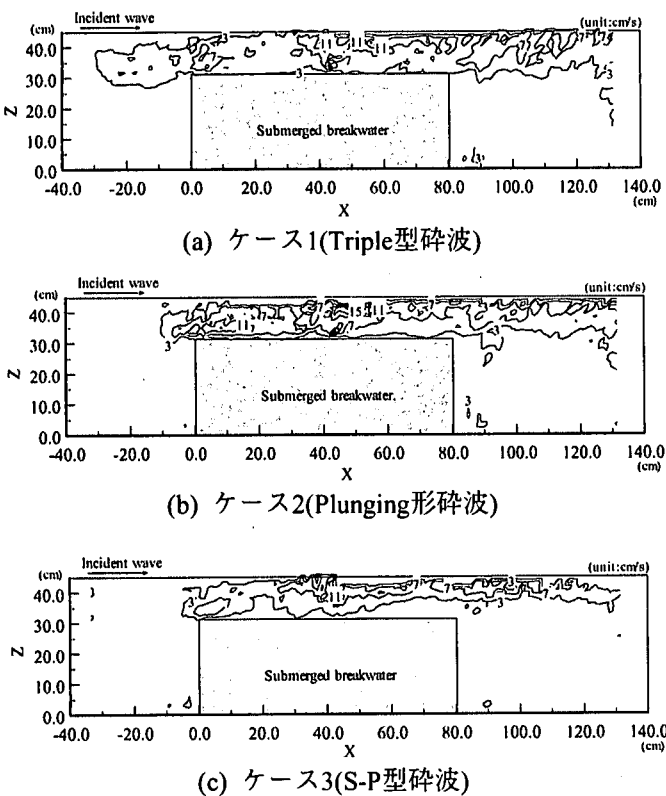


図-7 潜堤周辺での乱れ強度分布

周知のように、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の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。なお、図-8(a),(b),(c)のレイノルズ応力の分布は、それぞれケース1,2,3の碎波形式に相当している。レイノルズ応力は乱れの生成と密接に関係しており、レイノルズ応力の大きいところでは乱れの発生も大きく、乱れ強度が大きくなっている。図-7と図-8のパターンが類似しているのは当然といえる。図-8において、ケース1と2の潜堤沖側隅角部のレイノルズ応力の符号が互いに異なり、ケース1では負、ケース2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、効果的に波のエネルギーを消散させると推察される。

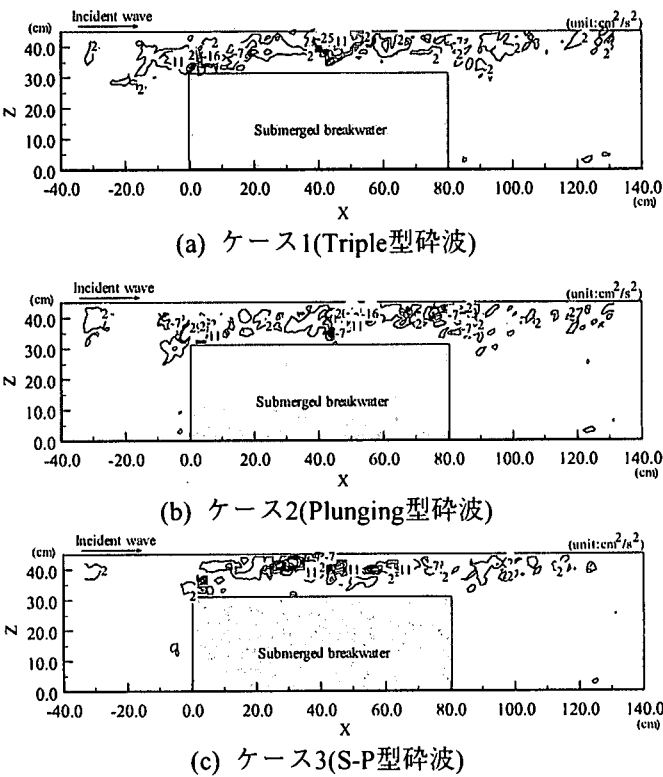


図-8 潜堤周辺のレイノルズ応力

7. おわりに

潜堤周辺での碎波に伴い発生する渦と流速場の時空間分布特性について、可視化手法を用いた水理実験により検討した。その結果、Triple型碎波は透過率がPlunging型碎波と同じであっても、反射率が小さく、エネルギー逸散率は大きいことを確認した。定常渦は、Plunging型碎波では安定した渦は形成されていなかったが、Triple型碎波では沖側端部に安定した渦が発生していたことから、天端上の渦構造は碎波形式に依存して変化することが判明した。

参考文献

- 1) 滝川清・山田文彦・松本健昨：潜堤上碎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, 1995.
- 2) 岩田好一朗・川崎浩司・安藤敏宏：潜堤による碎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, 1996.
- 3) 合田良実：港湾構造物の耐波設計, pp. 258-264, 1997.
- 4) 江藤剛治・竹原幸生：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, 1990.