

潜堤上碎波の分類とその内部特性に関する研究

松本 健作*・滝川 清**・山田 文彦***・嶋津 秀一****

1. ま え が き

地形や構造物によって水深が急変する場合には、一様勾配斜面上碎波では見られない種々の碎波形態が存在することが指摘されている(片野ら, 1992: 安田ら, 1995). 著者らは、不透過性矩形潜堤について、その碎波形態、及び内部特性を調べ、種々の特徴を示してきた(滝川ら, 1995, 1997). 本研究では、それら潜堤上碎波の、より統括的な分類を行うとともに、これまで不明瞭であった流況や波圧、及び周波数成分等の各碎波形態における特性を明らかにすることを目的としている。

2. 潜堤上碎波の分類

2.1 潜堤上碎波形態の観察

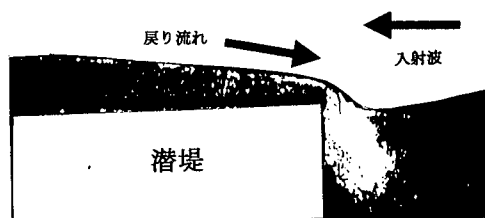
碎波形態の観察実験は、周期(T)を1秒から4秒までの8段階で、入射波高(H_i)を非碎波の条件から18 cm前後まで変化させた59ケースを、潜堤高(D)を固定して水深(h)を変化させ、 $D/h=0.7, 0.8, 0.9$ の3通りの水深で計177ケースについて行った。

本研究では観察結果から潜堤上碎波形態を、潜堤上崩れ波碎波、潜堤上巻き波碎波、落ち込み型碎波(図-1)、弱落ち込み型碎波(図-2)に、非碎波を加えた5種類に分け分類を行った。特に今回は落ち込み型碎波を、潜堤前面での戻り流れの落ち込みの強弱によって、2種類に分け、比較的小規模な方を弱落ち込み型碎波とした。また両者の違いは形成される乱流場の分布にも見られ、落ち込み型碎波では、潜堤前面の壁面に沿った戻り流れの落ち込みによって、比較的深度にまで乱流場が分布する(図-1(a))のに対し、弱落ち込み型碎波では乱流場は堤体から離れた水表面付近に分布している(図-2(a))。その後の乱流場の挙動も、落ち込み型碎波では波峰前面に集中し、Bore 状の水塊を飛び出させる(図-1(b))のに対し、弱落ち込み型碎波では広範囲に引き伸ばされて分布し、水塊突入形態は、潜堤上巻き波碎波と似通った形態をとる(図-2(b))。その他の各形態の特徴は滝川ら

(1995, 1997)に詳述してある。

2.2 潜堤上碎波形態の分類

著者らは従来まで、 $\sigma^2 h/g, H_i/h_s$ (σ : 角振動数, g : 重力加速度, h_s : 天端上水深)の2つの無次元パラメータを用いて潜堤上碎波形態の分類を行ってきたが、これは水深の変化に伴って全体の分布傾向が異なることから、

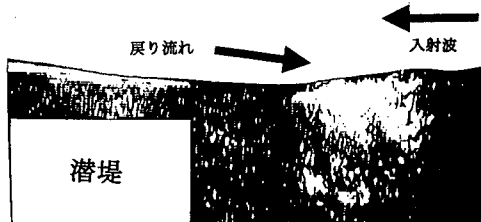


(a)



(b)

図-1 落ち込み型碎波 (ビデオ画像)



(a)



(b)

図-2 弱落ち込み型碎波 (ビデオ画像)

* 群馬大学 工学部 建設工学科
** 熊本大学 工学部 環境システム工学科
*** 熊本大学 工学部 環境システム工学科
**** 熊本大学 大学院 自然科学研究科

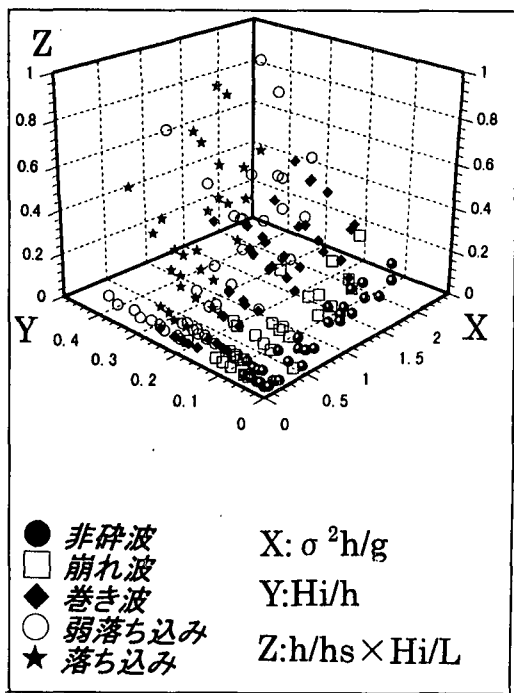


図-3 潜堤上砕波形態の分類図

潜堤上砕波の分類を十分規定しきれていないものと考えられる。そこで本研究では、次元解析によって得られた無次元パラメーターの主成分分析を行い、支配的なパラメーターを選び出すことにした。第1, 第2主成分はそれぞれ H_i/h , $\sigma^2 h/g$ であったが、これには潜堤の高さのパラメーターが入ってこないため、第3主成分の h/h_s までを考慮し、3次元的に分類を行うこととしたが、今回の実験では水深を3通りにしか変化させていないため、その傾向を掴みにくいことから、 h/h_s に波形勾配 H_i/L (L : 波長) を乗じた形で用いた。分類結果を図-3に示す。X, Y, Z 軸にそれぞれ H_i/h , $\sigma^2 h/g$, $c/h_s \times H_i/L$ をとってある。非砕波及び潜堤上崩れ波砕波は、波形勾配が比較的小さく、また天端上水深もある程度以上(非砕波: $Z < 0.1$, 潜堤上崩れ波砕波: $Z < 0.2$)の領域にまとまって分布している。潜堤上巻き波砕波、弱落ち込み型砕波は広範囲に混在しており、それらの境界は不明瞭になっている。落ち込み型砕波は、周期的には、 $X > 0.3$ の長周期側や、 $X < 2$ の短周期側では見られず、これらの範囲内の周期では、波高の増大によっても弱落ち込み型砕波しか起こらない。

次に、各形態の存在領域の定式化を試みた。本研究では X - Y , X - Z 平面への投影図に対して多項式近似を行い、両図の共有領域を各形態の存在領域と定義することとした。図-4, 図-5 にそれぞれ X - Y , X - Z 平面

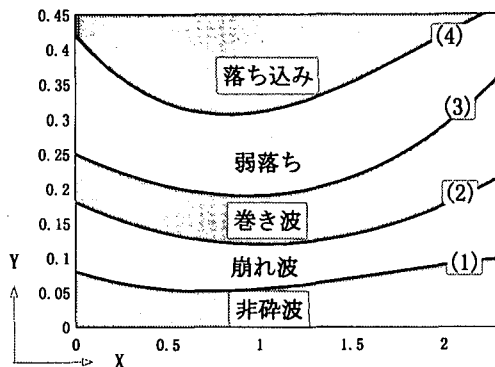


図-4 X-Y 投影図

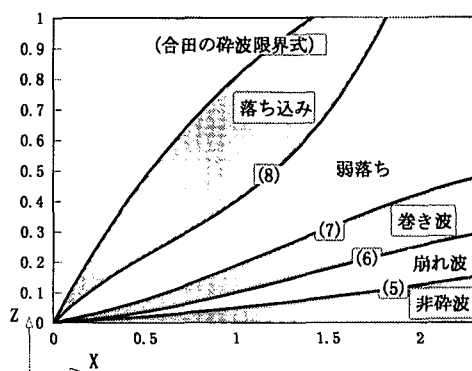


図-5 X-Z 投影図

への投影図を示す。図中の(1)~(8)の曲線は、各形態間の境界付近のデータを3次多項式で近似したものである。各係数は表-1に示してある。尚、図-5中の合田の砕波限界式は、今回の測定中で最も水深の浅い $h=45$ cm のものである。図-4, 図-5 の境界線近似に用いた3次多項式及び砕波限界式を以下に示す。

$$Y = a_1 + a_2 X + a_3 X^2 + a_4 X^3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

(図-4, (1)~(4))

$$Z = b_1 + b_2 X + b_3 X^2 + b_4 X^3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(図-5, (5)~(8))

$$Z = -1.53 \exp^{-0.75} + 1.53 \quad \dots\dots\dots (3)$$

(図-5, 合田の砕波限界式)

$$(X = \sigma^2 h/g, Y = H_i/h, Z = h/h_s \times H_i/L)$$

3. 潜堤上砕波の堤体前面における波圧特性

3.1 実験条件

本研究のような不透水性矩形潜堤を用いた場合、潜堤前面角において強い剝離が生じ、特に多量の戻り流れの落ち込みを伴う場合には、音を伴う激しい現象となる。この際に潜堤前面での波圧は、角における強い剝離の影

表-1 潜堤上碎波の碎波形態の存在範囲を示す近似式の各係数

	a_1	a_2	a_3	a_4
(1)	0.08	-0.085	0.075	-0.015
(2)	0.18	-0.12	0.06	-0.0005
(3)	0.25	-0.12	0.05	0.01
(4)	0.42	-0.3	0.23	-0.04
	b_1	b_2	b_3	b_4
(5)	0	0.03	0.02	-0.002
(6)	0	0.03	0.09	-0.021
(7)	0	0.1	0.12	-0.032
(8)	0	0.58	-0.38	0.2

表-2 実験条件

	周期 (sec)	波高 (cm)	形態
Case 1	1.43	4.0	非碎波
Case 2	1.43	7.2	潜堤上巻き波碎波
Case 3	1.43	18.2	落ち込み型碎波
Case 4	1.54	10.8	弱落ち込み型碎波

響と、その後形成される乱流場の影響で複雑な挙動をとるものと思われる。そこで、各潜堤上碎波形態の波圧の測定を行った。実験条件を表-2に示す。水深は50 cm、堤高は40 cmに固定してある。圧力計は、剥離の影響が強くでる潜堤前面角極近傍(測点1)と、本ケースにおいて戻り流れの落ち込みにより形成される乱流場が分布し、影響を強く受けられると思われる潜堤角下4 cm(測点2)の2箇所に設置し、サンプリング周波数500 Hzで測定を行った。

3.2 実験結果及び考察

図-6、図-7に、弱落ち込み型碎波、及び落ち込み型碎波の波圧の経時変化を示す。横軸は時刻(t)を波の周期(T)で、縦軸は測定された波圧(P)を、その入射波高を用いて $\rho g H_i$ でそれぞれ除して無次元化したものと、同時刻の測定断面での水位変動を入射波高で無次元化したものである。図-6では、測点2(下測点)での波圧は、正圧、負圧ともにやや遅れ気味の位相で水位変動に従って作用するのに対し、測点1(上測点)では、正圧は測点2とほぼ同程度であるのに対し、負圧が比較的に強く測点2の約1.5倍程度となっている。これは潜堤角における剥離の影響がでているものと思われる。

図-7の落ち込み型碎波では、測点1, 2ともに負圧が正圧の約1.5倍から2倍程度となり、上下の測点での差がほとんどなくなり、むしろ最大負圧は下側の、測点2においてみられる。また弱落ち込み型碎波との大きな相違点は、最大負圧付近において圧力振動が見られる点である。これは、戻り流れが堤体壁面に沿って落ち込むことによって形成される大規模乱流場の影響によるものと思われる。規模の大きなものでは、音を伴った激しい現象となり、多量の気泡を連行することからも、さらに細かいサンプリングをすることによって、より急峻な負圧の変動が見られる可能性がある。また、弱落ち込み型碎波でも乱流場は形成されるが、水面付近に分布するため、壁面の波圧にはさほどの影響を与えない。

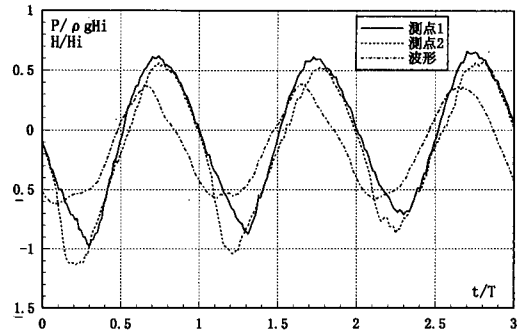


図-6 波圧の経時変化 (弱落ち込み型)

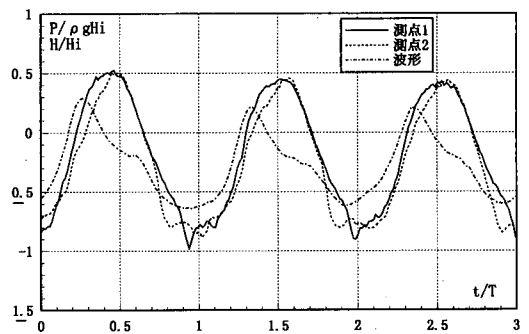


図-7 波圧の経時変化 (落ち込み型碎波)

4. 流況特性

4.1 実験条件

次に、これらの複雑な波圧を引き起こす潜堤前面での流況特性の解明を試みた。多量の気泡混入領域を発生させる現象であるため、可視化実験にはカノマックス社製 Current, PIV (Particle Image Velocimetry) を用いた。流速は1/30秒間隔の2枚の録画画像を用いた輝度の濃度相関によって測定した。また今回は、最大60程の発散量があった画像解析結果に画面内での連続条件を満たすよう Mass-consistent Model (Sherman, 1970) を用いた補正を行い、流況を大きく変化させることなく発散量を 10^{-9} のオーダーにまで抑えることができた。

4.2 結果及び考察

図-8, 図-9 にそれぞれ弱落ち込み型砕波と落ち込み型砕波の実験結果を示す。両図共に、潜堤前面において乱流場を形成する位相のものである。各図 (a) は流速分布, (b) は同時刻における渦度分布である。渦度は半時計回りを正方向にとってある。弱落ち込み型砕波では、潜堤前面において正方向の循環流が表れ、渦度は 15 l/s 程であるのに対し、落ち込み型砕波では大規模な流速分布の攪乱が生じ、この時、 $-40 \sim 60 \text{ l/s}$ 程の正負の渦度の混在領域が見られる。この局所的な正負の渦度の混在が負圧の振動に強く関与しているものと考えられる。この両砕波形態は、外観的には乱流場の規模の大小と分布領域の違いからの分類であるが、流況特性、及びそれに起因する堤体前面における波圧特性に大きな違いが見られることが解った。

5. 周波数成分特性

5.1 実験条件

次にこれら潜堤前面での挙動によって、砕波後の周波数成分にどのような特性がみられるのかを調べた。実験は、 20 cm 間隔の計 48 測点で波高を測定し、FFT による周波数スペクトル解析を行って、パワースペクトルの空間分布を求めた。

5.2 結果及び考察

図-10, 11 はそれぞれ潜堤上巻き波砕波、落ち込み型砕波のパワースペクトルの空間分布で、横軸は潜堤前面角を原点とした水平距離 (X) を入射波の波長 (L) で、縦軸は各測定断面におけるパワースペクトルの総和 (SP_n) を、入射波のパワースペクトルの総和 (SP_i) でそれぞれ除し無次元化してある。また f_1 が基本周波数成分、 f_2, f_3 がそれぞれ 2 倍、3 倍周波数成分、 f_0 が周波数 0.01 Hz 以下の定常成分となっており、図中の各線は、 L_0

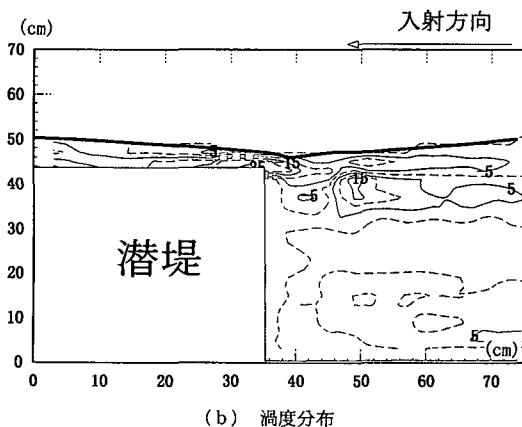
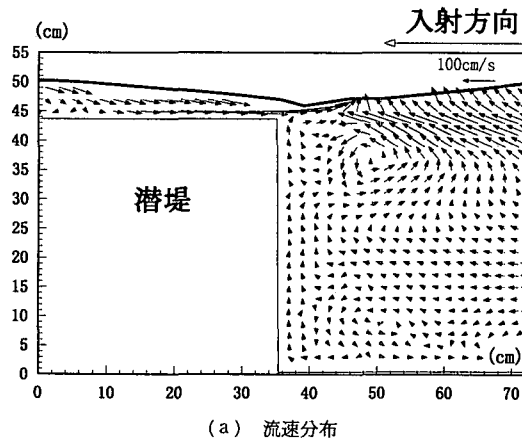


図-8 画像解析結果 (弱落ち込み型砕波)

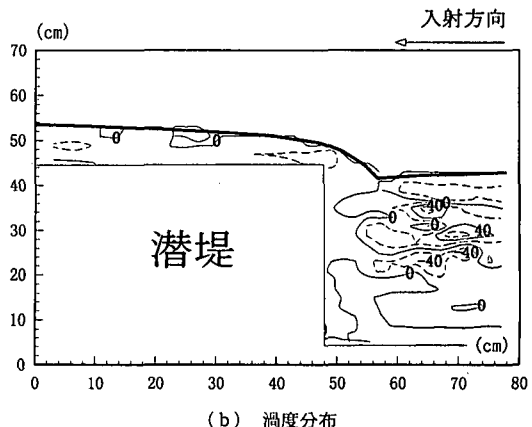
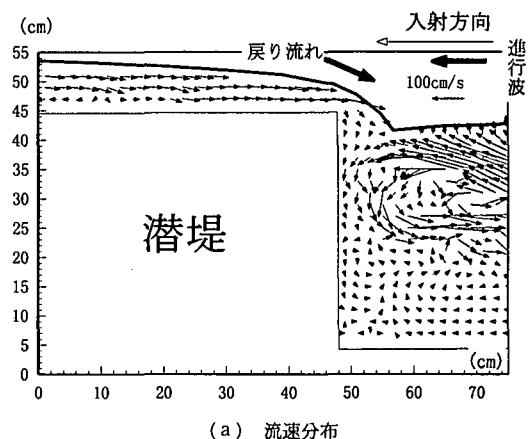


図-9 画像解析結果 (落ち込み型砕波)

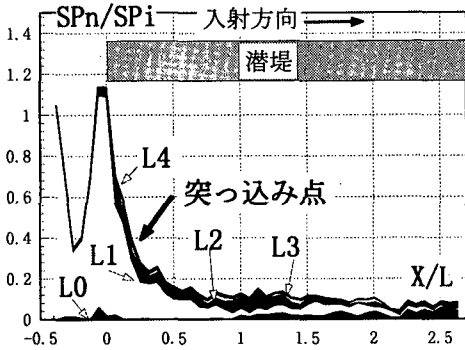


図-10 パワースペクトルの空間分布
(潜堤上巻き波碎波)

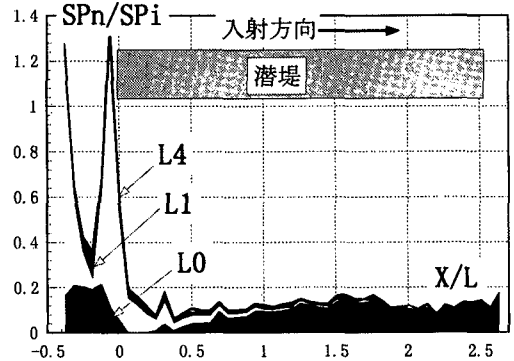


図-11 パワースペクトルの空間分布
(落ち込み型碎波)

$=f_0$, $L_1=f_0+f_1$, $L_2=L_1+f_2$, $L_3=L_2+f_3$ と累積して表示してあり, L_4 がその断面におけるパワースペクトルの総和を表わす。図-10を見ると, 潜堤上での水塊の突入によって急激にパワースペクトルが減少する。その後基本周波数成分の減少に伴って, 2倍3倍周波数成分及び定常成分の励起が見られ, それらの混在領域となる。一方, 落ち込み型碎波では, 潜堤角に差し掛かる以前に既にパワースペクトルが急激に減少している。これは潜堤前面での乱流場との衝突でエネルギー逸散が起きたためだと考えられる。またその他の大きな相違点としては, 基本周波数成分が急激に減少し, また2倍, 3倍周波数成分はほとんどみられず, 定常成分がそのほとんどを占めるようになる, という点である。これは, 落ち込み型碎波では潜堤前面において形成される乱流場をそのまま潜堤上に持ち上げるため, 水塊の飛び出しが行われる以前に, 既に波峰前面には多量の気泡が含まれており, そのまま Bore 状の水塊を飛び出させる, といった形態をとるため, 水面に水塊を突入させ, 第2, 第3の水塊の突入によって波動成分を励起するといったメカニズムと

は大きく異なるためであると考えられる。

参考文献

- 合田良実(1973): 不規則波の碎波指標について, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 571-577.
 滝川 滑 (1983): 有限要素法による斜面上の波の碎波変形と内部機構の解析, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 20-24.
 片野明良・村上信一郎・服部昌太郎 (1992): 幅広潜堤の消波特性の表示システム, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 61-65.
 安田孝志・陸田秀実・水谷夏樹・大屋敦嗣・多田彰秀 (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.
 滝川 滑・山田文彦・松本健作 (1995): 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.
 Amsden, A. A., F. H., Harlow, (1970): The SMAC method: a numerical technique for calculating incompressible fluid flows, Los Alamos Scientific Lab., N. Mex. (USA), LA-4370.
 Sherman, C. A. (1970): A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain, J. Appl. Meteor., 17, 312.
 Takikawa, K., K. Matsumoto, F. Yamada (1997): Numerical analysis of wave breaking over submerged breakwaters, Proc. 7th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Seoul, pp. 1605-1610