

潜堤上碎波変形の内部特性とその数値解析

滝川 清*・山田文彦**・松本健昨***

1. 概 説

碎波は、沿岸域において日常的に発生し、海浜変形過程や海岸構造物に作用する波圧等と密接に関係しており、その機構特性の解明は、海岸工学上重要な課題であるが、その取り扱いの難しさから現在でも十分な解明はなされていない。著者らは、FEM と SMAC 法を用いて数年前から碎波の数値解析手法の開発を行ってきたが、斜面上碎波に関して、実験との比較でも精度のよい結果を得ることに成功している(滝川ら, 1991)。しかし、他の碎波形態や、気泡、圧縮性、任意の境界形状の考慮等、今後さらに研究の進展が必要であるが、今回は、斜面上碎波とは異なる形態での碎波として、潜堤上碎波に注目してその碎波変形や内部特性について研究を行ったものである。潜堤上碎波に関する研究は、現在まで数多くなされており、斜面上碎波では見られない跳水型や2段型の碎波形態も確認されている(服部ら, 1992)。本研究では、流れの可視化画像解析システム等を用いた実験、及び斜面上碎波に用いたものと同様の SMAC 法による数値解析を行って、潜堤上碎波変形、及び渦度等の内部諸量についてその特性を調べた。

2. 潜堤上碎波の内部特性に関する実験的研究

2.1 実験条件

今回の実験では、長さ 38(m)、高さ 0.8(m)、幅 0.5(m)の造波水槽に長さ 1.0(m)、高さ 0.4(m)の木製潜堤を固定し、水深を 0.5(m)として、様々な波高、周期で波を入射させ、そのビデオ画像によって、潜堤上碎波の碎波形態の特性について検討を行い、得られた結果から、各碎波形態の大まかな分類を試みた。また、流れの可視化画像解析システムを用いて流況を解析し、その内部特性について調べた。図-1 に実験装置を示す。

a) ビデオ画像による潜堤上碎波の碎波形態

表-1 に実験条件を示す。図-2, 3, 4 はそれぞれ、CASE 1, CASE 2, CASE 3 の実験のビデオ画像である。

図-2 の CASE 1 では、潜堤にさしかかった入射波と潜堤上の戻り流れが衝突し戻り流れが水表面を攪乱しながら伝播している。図-3 の CASE 2 では、入射波と潜堤上の戻り流れが潜堤前面の隅角付近で衝突し、その後、潜堤上に水塊が飛び出している。また同規模の水塊の飛び出しが、ほぼ同時に 2 つ見られる。これは、服部らによって 2 段碎波として指摘されている。なお、第 1 の水塊の飛び出しは、入射波と戻り流れの衝突による跳水碎波によって発生したものであり、第 2 の水塊の飛び出しは本来の入射波から飛び出したものであると思われる。また、図-2 でみられたように、戻り流れが入射波の水表面を攪乱しながら波の後部へ伝播してゆく様子もみられる。図-4 の case 3 では、戻り流れが入射波と衝突する前に潜堤前面角からいったん落ち込み、その後、入射波に巻き込まれ、潜堤前面の隅角付近で多量の気泡を含み、激しく攪乱している。入射波はこの乱れの領域ごと潜堤に衝突しているが、波の前面は、既に多量の気泡を含んでいる。その後、潜堤上で水塊の飛び出しがみられるが、この際、図-3 のように明瞭ではなく、また時間的なずれもあるが、第 1 の水塊の飛び出しの後、第 2 の、比較的大きな水塊の飛び出しがみられる。これは、図-3 でみら

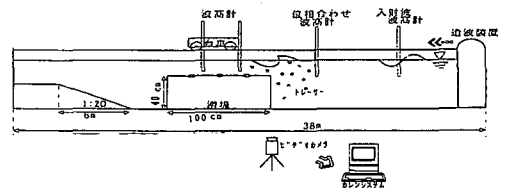


図-1 実験装置

表-1 実験条件

	T (sec)	h (cm)	H_i (cm)	H_0/L_0 (cm)	D (cm)	l (cm)
CASE 1	1.27	40	10.0	0.04	40	100
CASE 2	0.90	50	12.0	0.097	40	100
CASE 3	1.70	50	4.5	0.011	40	100

T : 周期, h : 水深, H_i : 入射波高, H_0/L_0 : 沖波波形勾配, D : 潜堤高, l : 潜堤長

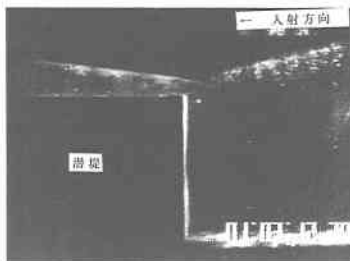
* 正会員 工博 熊本大学教授 土木環境工学科

** 正会員 工修 熊本大学助手 土木環境工学科

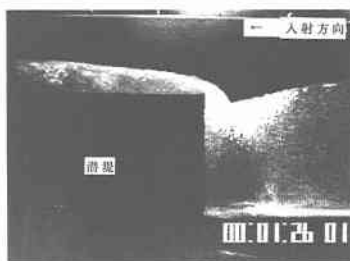
*** 学生会員 工修 熊本大学大学院 自然科学研究科



(a) $T=24.08$ 秒



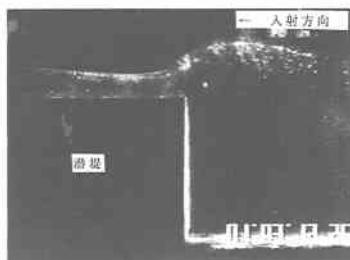
(a) $T=12.20$ 秒



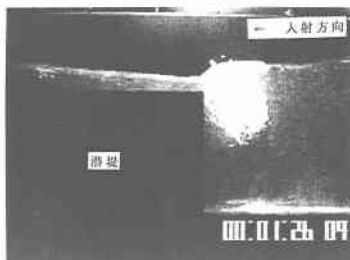
(a) $T=26.01$ 秒



(b) $T=24.24$ 秒



(b) $T=12.25$ 秒



(b) $T=26.09$ 秒



(c) $T=24.28$ 秒



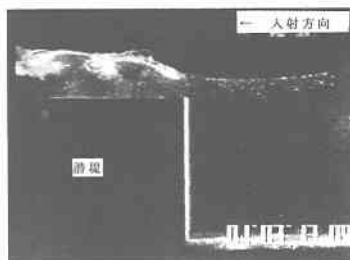
(c) $T=13.02$ 秒



(c) $T=26.21$ 秒



(d) $T=25.06$ 秒



(d) $T=13.09$ 秒



(d) $T=26.25$ 秒

図-2 ビデオ画像 (崩れ波型)

図-3 ビデオ画像 (2段型)

図-4 ビデオ画像 (落ち込み型)

れた2段碎波と同じ発生機構によるものと思われる、戻り流れが入射波によって押し戻されることによるものと、本来の入射波が潜堤に衝突することによって、それぞれ第1、第2の水塊が飛び出しているものと思われる。また、潜堤前面の隅角付近の気泡を含んだ領域、及び水塊の突入によるBoreによって、波の前後で多量の気泡を含む大きな乱れの領域を発生させている。次にこれらの碎波形態の大まかな分類を試みた。図-5は、 $\sigma^2 h/g$ を横軸に、潜堤上水深と沖波波高の比 H_0/h_s を縦軸にとり、潜

堤上での各碎波形態を分類したものである。なお、 H_0 は沖波波高、 h_s は潜堤上水深である。ここで、崩れ波型、巻き波型と示したのは、それぞれ斜面上碎波でのそれと似通った形態をとったもので、2段型としたのは、明瞭に2つの水塊の突入がほぼ同時に現れたものを指し、また、落ち込み型としたのは、戻り流れが入射波との衝突前に潜堤の側面まで落ち込み、入射波がその乱れの領域ごと潜堤に衝突したものを指すものとする。図-5によると、碎波形態は、縦軸の値の増加に伴い、非碎波、崩

れ波型、巻き波型と遷移してゆき、その分布は $\sigma^2 h/g$ の値によらず一様に分布しているように見える。また、縦軸の値 H_0/h_s で1付近からそれ以上になると、碎波形態は斜面上碎波ではみられなかった2段型碎波や、落ち込み型碎波となる。この潜堤上碎波特有の碎波形態は、 $\sigma^2 h/g$ によって分類される傾向がみられ、2段型碎波は入射波が比較的短周期のときのみにあられた。なお、今回の実験では、波高、周期のみを変えて行ったものであり、潜堤の寸法、水深は一定として行った。今後は、さらに

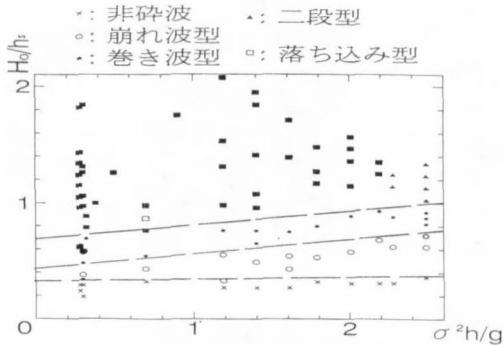
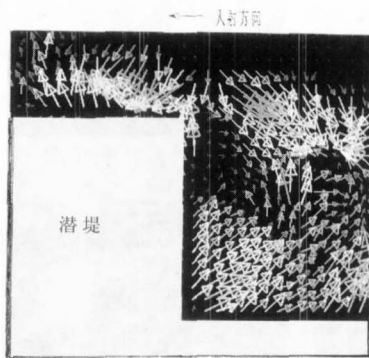
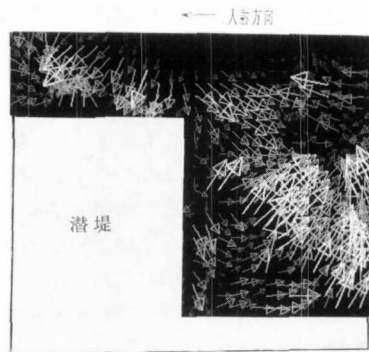


図-5 潜堤上碎波の碎波形態の分類



(a) $T=13.02$ 秒



(b) $T=13.09$ 秒

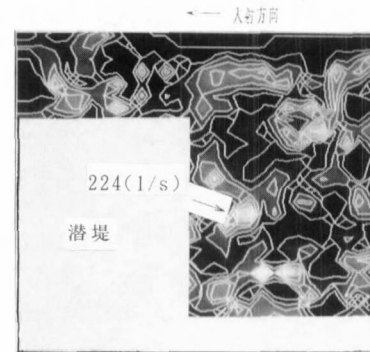
図-6 実験結果 (流速分布)

様々な条件で実験を行う必要があると思われる。

b) 流れの可視化画像解析システムによる流況解析
 流れの可視化画像解析システム (Current PTV) を用いて流況の画像解析を行った。ビデオ画像から4枚のフィールド画像 (3/60 秒) を取り込み、そのフィールド画像内でのポリスチレン製、直径約1mmのトレーサー粒子の動きを追跡する事によって、各粒子の速度を求めた。CASE 2の解析結果を、図-6、図-7に示す。図-6(a), (b) はそれぞれ図-3の (c), (d) での潜堤前面付近の流速分布、図-7は図-6の各時間に対応した、渦度分布である。なお、矢印の大きさは、流速の大きさを表している。図-6の (a) では、潜堤上に水塊が飛び出したところであるが、潜堤側面において比較的大きめの上昇流が発生しているが、現象と比較すると過大評価であり、境界処理に問題があると思われる。図-7の (a) では、潜堤前面角、及び波の前後部水面付近に140~170 (1/s) 程の渦が分布している。図-6の (b) で、潜堤側面の複雑な流況がみられ、図-7(b) では、潜堤側面で、224 (1/s) の大きな渦が発生している。

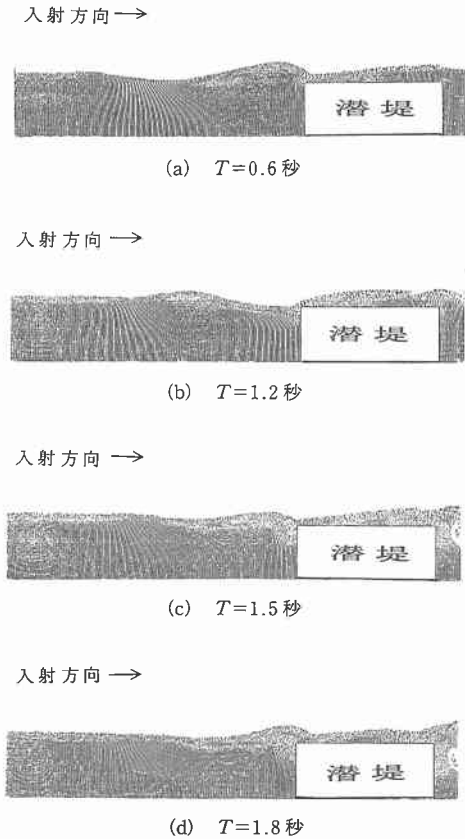


(a) $T=13.02$ (秒)

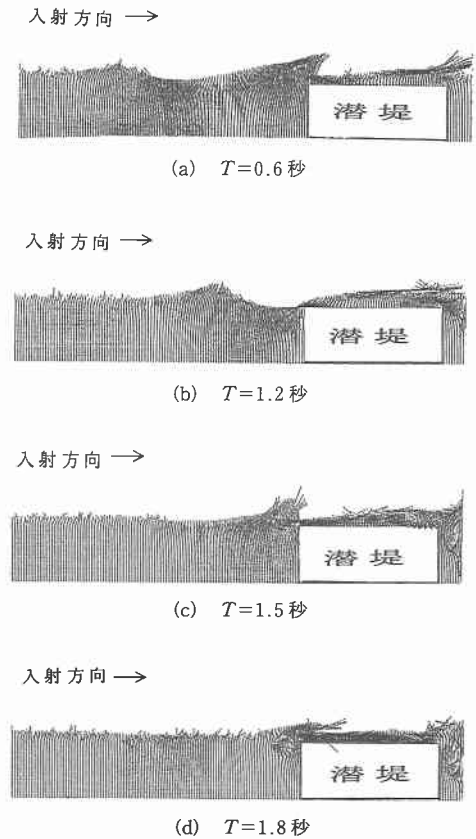


(b) $T=13.09$ (秒)

図-7 事件結果 (渦度分布)



図—8 数値解析結果 (CASE 2 マーカー粒子)



図—9 数値解析結果 (CASE 2 流速ベクトル)

3. 潜堤上碎波の内部特性の数値解析

3.1 数値解析手法及び解析条件

碎波は、非ポテンシャル成分である渦度の発生、消滅過程を含む現象であり、ポテンシャル理論がそのまま適用できない。そこで、碎波直前までを計算した滝川ら(1983)のFEM解析結果を初期条件として、その後の碎波変形をSMACによって計算した。計算には、 $2(\text{cm}) \times 1(\text{cm})$ の直行格子を用い、 x, y 方向にそれぞれ、161, 80分割した領域で計算を行った。初期条件として潜堤前面で、2波長分の波を与え、2周期間計算を行った。これは、潜堤上碎波では、碎波後の潜堤上の戻り流れが後続の波に与える影響が大きいものと考えられるためである。尚、 xy 座標はそれぞれ、波の進行方向、及び鉛直上向き方向を正として計算している。

3.2 解析結果及び考察

図—8は、潜堤上碎波の数値解析結果で、マーカー粒子、図—9は、図—8の各時間に対応した流速ベクトルである。(a)は、第1の入射波が潜堤にさしかかったところであり、その後潜堤上に水塊が飛び出している。(b)

では、第1の波の碎波後、潜堤上の戻り流れが潜堤角から落ち込んでおり、その後(c)で、戻り流れが、やや落ち込んだ潜堤角付近で第2の入射波と衝突しており、潜堤角付近が攪乱されている。図—9の(a)、(c)はそれぞれ第1、第2の入射波が潜堤にさしかかったときの流速ベクトルであるが、水塊の飛び出しの形態が異なることが解る。戻り流れと入射波の衝突による、跳水碎波を表しているものと思われる。なお、容量上の問題から、潜堤の後部で十分な領域を確保できず、流出境界とはしているが、境界の影響がでている。図—10の(a)、(b)は、図—8のそれぞれ(b)、(c)に対応した渦度分布である。潜堤上に水塊が突入しており、水表面付近で、 $60(1/\text{s})$ 程の渦が発生している。このとき、潜堤前面角で局所的な渦度の分布がみられ、最大値で $120(1/\text{s})$ の渦が発生している。実験値では、時間的には正確な一致はしていないが、位相の似通った図—7の(c)で最大値で $170(1/\text{s})$ であり、分布の形状等も比較的精度はよいと思われる。図—7の(c)では、戻り流れと第2の波が潜堤前面角で衝突しており、ここで、最大値で $200(1/\text{s})$ 程の渦が発生している。実験値では、 $224(1/\text{s})$ となってお

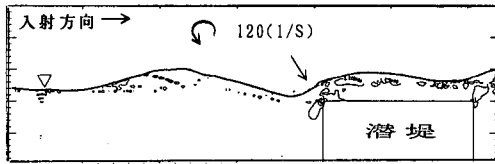
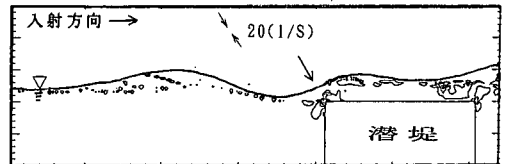
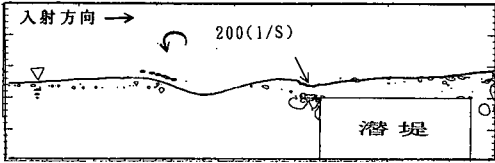
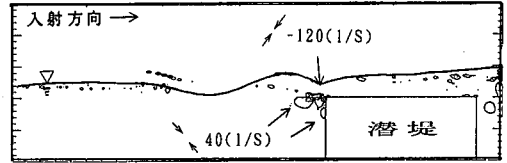
(a) $T=1.2$ 秒(a) $T=1.2$ 秒(b) $T=1.5$ 秒(b) $T=1.5$ 秒

図-10 数値解析結果 (CASE 2 渦度分布)

図-11 数値解析結果 (CASE 2 歪み度分布)

り、定量的には精度よく再現できていると思われるが、数値解析では潜堤角で発生しているのに対して、実験値では、やや下の潜堤側面において発生している。また実験値では、入射波と戻り流れの衝突時などでも $190 (1/s)$ 程の渦度も現れているが、数値解析結果では、 $60 \sim 80 (1/s)$ 程であり、実験値が大きめの値をとる傾向がみられる。これは、数値解析には、気泡や流体の圧縮性などの影響を考慮していない点や、実験的にも多量の気泡を含んだ領域では、ビデオ画像でトレーサー粒子を追跡することが難しいという問題によるものと考えられる。図-11の(a), (b)は図-8のそれぞれ(b), (c)に対応した歪み度分布である。図-11の(a)では、極端な歪み度はみられず、潜堤前面の隅角付近においても、 $20 (1/s)$ 程である。図-11の(b)では、潜堤前面の隅角付近で、 $120 (1/s)$ 程の負の歪み度がみられる、またその周囲で $40 (1/s)$ 程の正の歪み度がみられる。潜堤角から落ち込む戻り流れと入射波の衝突による、激しい攪乱の様子を表しているものと思われる。

4. あとがき

潜堤上碎波特有の碎波形態を調べ、その内部特性の考察を行った結果、斜面上碎波とは異なる形態、及び内部特性がみられ、流れの可視化画像解析システムと数値解析の比較も良好であったといえる。今後は、他の碎波形態での内部特性についても研究をすすめ、圧力、エメルギー等も含めた、より詳細な検討が必要であると思われる。また、実験における多量の気泡を含んだ領域でのトレーサー粒子の追跡や、数値解析での気泡や、圧縮性の影響の検討等の課題も残されている。

参考文献

- 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. 646-650.
- 滝川 清 (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.
- 滝川 清・山田文彦・有元光久・田淵幹修 (1991): 斜面上碎波変形課程の内部特性とその数値解析, 第38回海岸工学論文集, pp. 61-65.