

不規則波による大型海浜断面変形実験と外力場の多点同期計測

清水隆夫* ・池野正明** ・岡安章夫***
 栗山善昭**** ・佐藤慎司***** ・島田広昭*****
 清水琢三***** ・武若 聡***** ・西 隆一郎*****

1. はじめに

海浜変形現象を解明するためには高精度の現地観測が望まれ、我が国においては大湊や波崎に観測桟橋が建設されている。しかし、桟橋をつくらずに高波浪時の海浜変形を観測することは安全性や費用などの点で難しいものがある。そこで、できるだけ現地に近いデータを得るために欧米では不規則波を用いた大型造波水路実験が行われている。米国の SUPERTANK Laboratory Data Collection Project (Kraus et al., 1992), オランダの Large Installations Plan (Arcilla et al., 1993), ドイツの MAST Program が、いずれも複数組織による共同研究として、最近 4 年ほどの間に行われている。こうした試みも水路の固有振動の問題や測定器の同期が十分でないなど不満点があった。

そこで今回、多数の研究者が測定器と人員を持ち寄り、自由長周期波を抑えた不規則波による海浜変形の大型岸沖断面実験と外力の多点同期観測を実施し、堆積性波浪と侵食性波浪による履歴効果も含めた海浜変形現象の解明をはかった。

2. 実験方法と実験条件

幅 3.4 m, 深さ 6 m, 長さ 205 m の大型造波水路に中央粒径 1 mm の砂で勾配 1/30 の砂斜面をつくり、水深 4 m で岸沖海浜変形実験を行った。容量式波高計 22 台、容量式遡上計 1 台、2 成分電磁流速計 11 台、光学式濁度計 3 台を図 1 のように配置し、合計 48 ch のデータを計測台車上の 24 ch のデータレコーダ 2 台で完全に同期させて収録した。波高計については初期静水時汀線位置に W_0 、そこから沖へ砂斜面上に 5 m 間隔で $W_1 \sim W_5$ 、8 m 離して W_6 、10 m 間隔で $W_7 \sim W_{14}$ 、さらに水平床上に $W_{15} \sim$

W_{17} 、また、 W_0 から岸側に 2 m 間隔で $W_A \sim W_C$ を設置し、計測台車に W_{18} を搭載した。 $W_{15} \sim W_{17}$ は不規則波の入射波と反射波を分離できるように 5.12 m, 1.08 m の間隔とした。遡上計 R については静水時汀線の沖 6 m から岸側へ長さ 20 m の容量線を砂面上 2 cm となるように約 70 cm 間隔で支持して展張した。流速計については初期静水時汀線位置に C_A 、20 m 沖に C_1 、さらに 13 m 沖に C_2 、そこから 10 m 間隔で $C_3 \sim C_6$ を設置し計測台車に $C_7 \sim C_{10}$ を搭載した。 C_A は三本足の架台に下向きに取り付け、架台の足を砂面に差し込んで測定部が砂面上 1 cm になるように設置した。 $C_1 \sim C_6$ は初期砂面上 15 cm に設置した。 $C_7 \sim C_9$ は昇降装置の下から 40 cm 間隔で取り付け、 C_7 の横に C_{10} を取り付けた。 C_A と C_{10} は水平 2 成分、それ以外は岸沖・鉛直 2 成分とした。 R と C_A については砂面高さの変化に応じて設置高さを調節した。測深や浮遊砂濃度分布などの測定のため計測台車が水路上を移動するため波高計、遡上計、流速計は C_A を除いてすべて壁際に設置した。濁度計については後方散乱型 T_1 を C_7 の横に、透過型 T_2, T_3 を C_8, C_9 の横に並べて計測台車の昇降装置に取り付けた。これらの濁度計は攪拌・循環タンクを使って検定した。また、砕波帯の水面近くで気泡が混入しているところでは浮遊砂と気泡を濁度計の出力から分離して識別することが難しいので T_2 と T_3 については池野ら (1996) にならってポンプ採水による平均浮遊砂濃度の測定を併用した。この他に、ビデオカメラ 4 台による撮影と、清水ら (1996) にならった捕砂器による初期静水時汀線における漂砂量の測定を行った。測深には車輪型連続式砂面計を用いた。浮遊砂と波作用後の底質についてはエメリー管法による粒度分析を行った。実験ケースは有義波周期 4.93 s, 有義波高 0.43 m の堆積性の不規則波を 13 h 作用させた後引き続いて有義波周期 3.06 s, 有義波高 1.12 m の侵食性の不規則波を 6 h 作用させたケース 1 と、整地しなおした砂斜面に侵食性の不規則波を 25 h 作用させたケース 2 の 2 ケースを実施した。

* 正会員 工修 電力中央研究所研究主幹 水理部
 ** 正会員 工博 電力中央研究所主査研究員 水理部
 *** 正会員 工博 横浜国立大学助教授 大学院工学研究科
 **** 正会員 運輸省港湾技術研究所主任研究官 波崎分室
 ***** 正会員 工博 建設省土木研究所主任研究員 海岸研究室
 ***** 正会員 関西大学助手 工学部土木工学科
 ***** 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所
 ***** 正会員 工博 九州大学助手 工学部建設都市工学科
 ***** 正会員 工修 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科

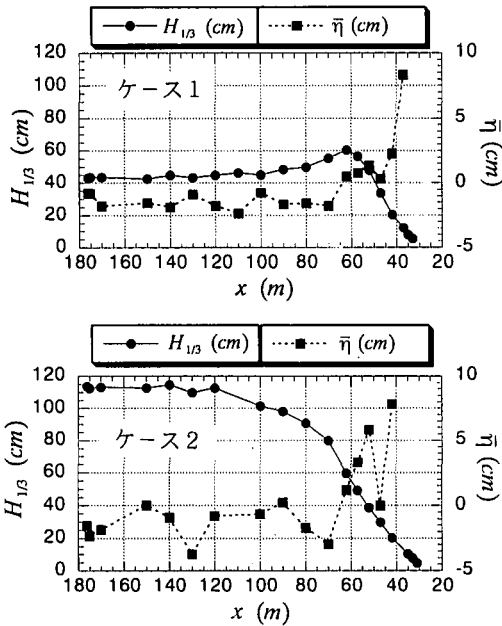


図-4 有義波高と平均水位

図-2 からは不規則波の波別の碎波減衰の経過が読み取れる。まず、碎波帯にさしかかると大きな波が碎波減衰していくと同時に、波の連と連の間の小さな波が相対的に大きくなっている。swash zoneの手前あたりからは波数が急激に減っている。 $W_3 \sim W_0$ を比較すると波の連の後の引波が長く続いて波数が減っているのがわかる。

図-3 からは波の連の大きな波によって乱れが強くなり、浮遊砂濃度も高くなっているのがわかる。

造波機の停止後の波形を測定したところ、周期 80 s、週上計の振幅で 2.5 m 程度、水位にして 8 cm 程度の周期的な振動が見られたが、水深の大きなところでは水面振動は殆ど認められなかった。

(2) 波高・周期・平均水位

図-4 に両ケース初期に測定した有義波高と平均水位の岸沖分布を示した。ケース 1 の初期の有義波高は碎波前にかなり大きくなってから減衰しており、 $X=62$ m に代表的な碎波点が明瞭である。これに対してケース 2 については緩やかに碎波減衰してははっきりしないが、 $X=120$ m あたりから碎波減衰がはじまっている。平均水位は変動が大きく、set-down は明瞭でないが、set-up は 10 cm 程度まで測定されている。swash zone については平均水位が定義しにくいのでのせていない。

図-5 には両ケース初期に測定した平均周期、有義波周期、ならびに 1/10 最大波周期の岸沖分布を示した。両ケースとも有義波周期と 1/10 最大波周期については汀線近傍で急激に上昇しているが、平均周期については両ケースともいったん減少してから増加している。これは、

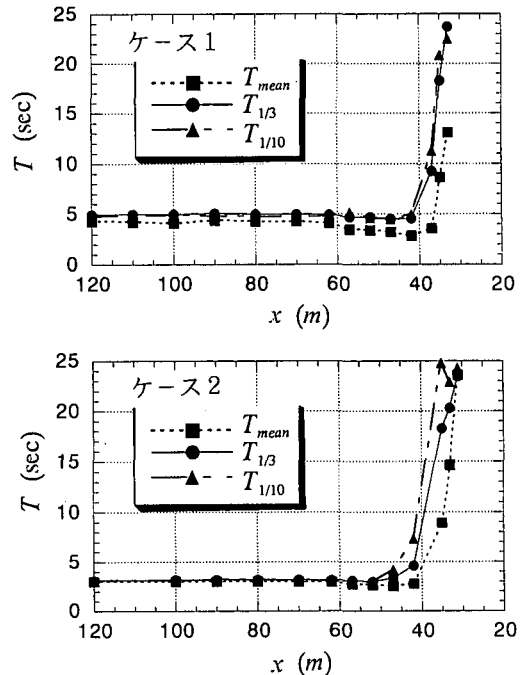


図-5 周期の岸沖変化

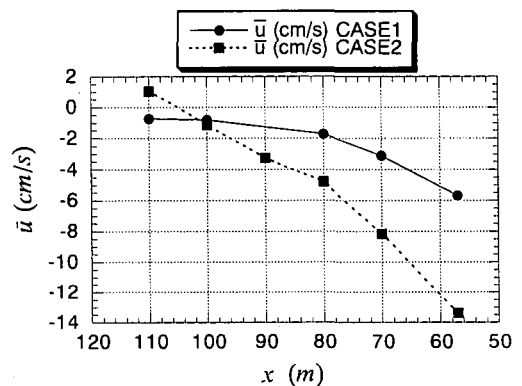


図-6 もどり流れの流速

plunging 碎波による波の分裂によるものと考えられる。

(3) もどり流れの流速

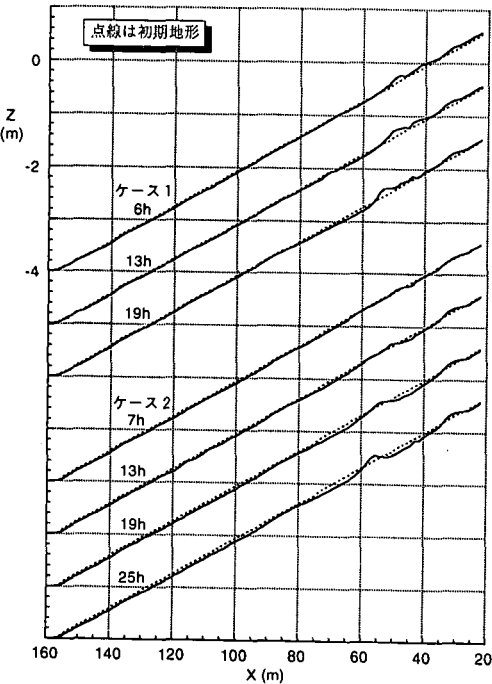
図-6 に底面から約 15 cm の高さに設置された流速計で測定された両ケース初期のもどり流れの流速（時間平均流速）の岸沖分布を示した。ケース 1 では沖から次第に強くなって、代表的な碎波点にあたる $X=62$ m 付近で 6 cm/s に達している。これに対して、ケース 2 では碎波減衰がはじまっている $X=100$ m 付近でも、もどり流れがほとんど無く、碎波帯を進むにつれてもどり流れが強くなって、14 cm/s にまで達している。

表一 採水による平均浮遊砂濃度の鉛直分布

ケース 1, 0~6 h			ケース 2, 0~7 h		
X(m)	Z(m)	$\bar{C}$ (mg/l)	X(m)	Z(m)	$\bar{C}$ (mg/l)
80	-0.45	4	100	-1.10	45
	-0.85	9		-1.50	61
	-1.25	34	90	-0.75	75
70	-0.50	34		-1.15	131
62	-0.25	18	80	-0.42	36
				-0.82	82
			70	-0.48	17
			62	-0.20	9

表二 平均流速の鉛直分布

ケース 1, 0~6 h			ケース 2, 0~7 h		
X(m)	Z(m)	$\bar{U}$ (cm/s)	X(m)	Z(m)	$\bar{U}$ (cm/s)
80	-0.45	-1.9	100	-1.10	-6.7
	-0.85	-1.9		-1.50	-5.3
	-1.25	-4.4		-1.90	0.1
	-1.25	1.2		-1.90	-0.9
70	-0.10	11.2	90	-0.75	-8.9
	-0.50	-3.3		-1.15	-7.7
	-0.90	-3.3		-1.55	-3.1
	-0.90	-3.6		-1.55	-5.2
62	-0.25	-3.6	80	-0.42	-7.1
	-0.65	-3.9		-0.82	-9.8
	-0.65	-6.1		-1.22	-6.3
	-0.27	-7.9		-1.22	-8.1
52	-0.27	-12.8	70	-0.08	8.6
				-0.48	-12.5
				-0.88	-8.6
				-0.88	-12.8
			62	-0.20	1.5
				-0.60	-14.5
				-0.60	-18.8
				-0.25	-11.1
			52	-0.25	-14.4



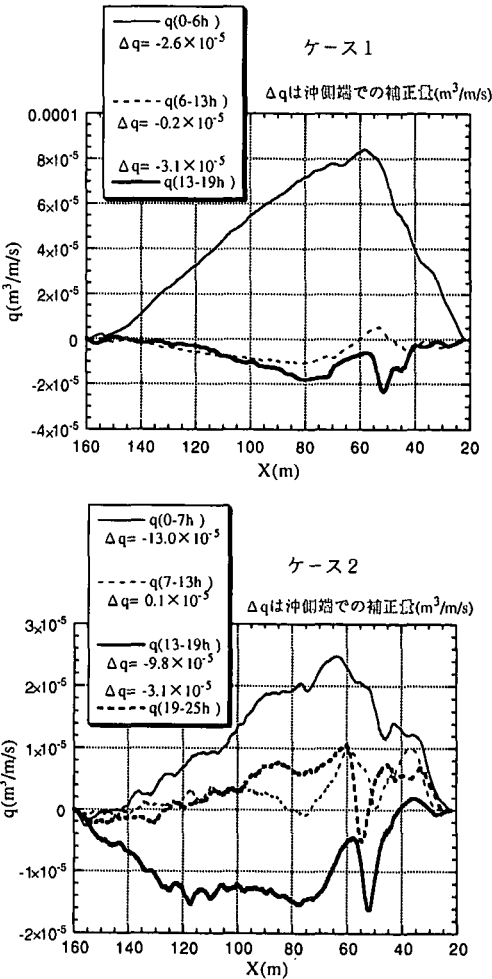
図一7 地形変化

(4) 浮遊砂濃度と平均流速の鉛直分布

表一に採水による平均浮遊砂濃度の鉛直分布を示した。表二には水平流速の時間平均の鉛直分布を示した。流速については、 C_7 の水平成分と C_{10} の岸沖水平成分が同じ地点の同じ高さで測定されるので、表中には両方を示した。浮遊砂濃度については底面に近いデータほど濃度が高くなっているが、流速についてははっきりした鉛直分布の傾向が認められない。 C_7 と C_{10} のデータにもかなりの差が認められ、これが、測定器の違いによるものか、水路幅方向に60 cm程度離れた点の測定であるからなのかは明らかでない。

(5) 地形変化

図一7に地形変化を示した。連続式砂面計で10 cmピッチに測定された地形データには初期地形以外のすべての計測について斜面の沖側端まで砂澱の形成が認められた。図では初期地形からの変化を明瞭にするために、



図一8 漂砂量

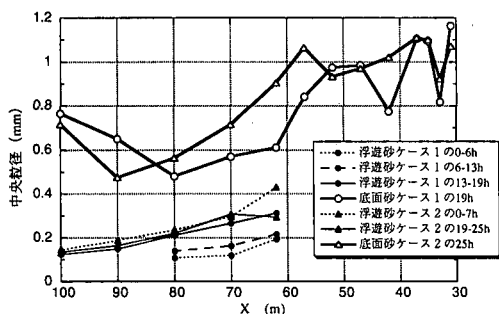


図-9 浮遊砂と底面砂の粒径

平均幅 1.5 m の移動平均をかけてある。

19 h あるいは 25 h の波作用で生じた地形変化は比較的小さいものであったが、堆積性の波を用いたケース 1 についてはステップ地形が、侵食性の波を用いたケース 2 についてはバーとバームが形成され、典型的な岸沖海浜断面形状となった。ケース 1 の終わりに 6 h 侵食性の波を作用させたことで、ステップがバーに変わりつつあることも見てとれる。また、ケース 1 のステップの位置は代表的な碎波点の少し岸側であるが、ケース 2 のバーは碎波減衰がはじまる $X=100$ m あたりよりもはるかに岸側、平均周期が減少するあたりとなっている。沖の砂斜面が全体的に下降しており、これには砂の締固め作用も起因しているものと考えられる。実験後、排水して調べたところでは $X=160$ m よりも沖側、造波板まで薄くヘドロが溜まっていたが砂の堆積はなかった。

(6) 漂砂量

図-8 に地形変化から逆算した岸沖漂砂量を示した。二つの時刻の砂面高さの差を岸から沖に積分して単位時間あたりの移動量を求めているが、前述のように全体の砂の体積が異なるために、沖側端で漂砂量に誤差が蓄積する。図では凡例の中に示されている誤差を積分区間全体に均等に振り分けてある。ステップ、バー、バームを形成した漂砂量の分布形が見られるものの、定量的な議論を行うためには砂の締固め作用、分級作用、地形変化の 3 次元性などを検討する必要がある。

(7) 浮遊砂と底面砂の粒径

図-9 に底面から 55 cm の高さで採水した浮遊砂と各ケース終了後の底面砂の中央粒径を示した。

浮遊砂の粒径は底面砂に比べてかなり小さく、波高が

小さいケース 1 の初期よりもケース 2 の方が大きい。岸沖分布は、沖の方から岸に向かって粒径が大きくなっている。

底面砂については、バーの沖側で初期粒径よりもかなり小さく 0.5 mm 程度、バーとバームの上では初期粒径より若干大きくなっている。

4. おわりに

今回、多数の研究者が集まって不規則波による大型海浜断面変形実験と外力場の多点同時計測を行ない、貴重なデータを取得することができた。そのなかで、以下のようないくつかの知見が得られ、問題点が明らかになった。

- ・碎波減衰において周期の変化にも着目する必要がある。
- ・不規則波による岸沖海浜変形では碎波減衰が始まる場所よりもかなり岸側にバーができることがある。
- ・地形変化から漂砂量を推定する場合、砂の締固め作用や分級作用などを考慮する必要がある。

なお、本研究は海浜変形研究会（河田恵昭主査）の活動の一環として行われたものである。

最後に、今回の実験に協力いただいた（株）CRS の稲葉大介氏、安川剛史氏、（株）八重洲土木技術センターの嶋野三男氏、五洋建設（株）の山田晶子氏、横浜国立大学の加瀬英樹氏、大山基氏、上野慎一郎氏、栗原明夫氏、森信耕太氏、斎藤正文氏、Nistor 氏、関西大学の鹿室宏氏、九州大学の小野信幸氏、早稲田大学の伊吹英子氏、東京大学の Bayram 氏、Gharabaghi 氏に謝意を表します。

参考文献

- 池野正明・清水隆夫・田中寛好・今井澄雄 (1996): 実規模不規則碎波帯内における浮遊砂フラックス, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 496-500.
- 清水隆夫・池野正明・鹿島遼一・今井澄雄 (1996): swash zone における波毎の岸沖漂砂量と前浜地形変化について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 511-515.
- Arcilla, A. S., J. A. Roelvink, B. A. O'Connor, A. Reniers and J. A. Jimenez (1993): The DELTA FLUME '93 EXPERIMENT, Proc. Coastal Dynamics '94, ASCE, pp. 488-502.
- Kraus, N. C., J. M. Smith and C. K. Sollitt (1992): Supertank laboratory data collection project, Proc. 23th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 2191-2204.