

透過性離岸堤の機能についての研究 [I]

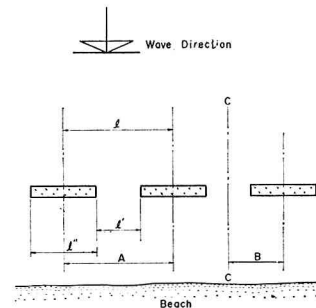
——離岸堤周辺の流れについての実験的研究——

堀 田 新 太 郎*

はじめに

近年、海岸侵食防止工の一方法として異形コンクリートブロックによる透過性離岸堤が構築される例が多くなりつつあるが、その離岸堤の機能については必ずしも十分に理解されているわけではない。透過性離岸堤の堤内への波高伝播についての理論的研究、実験および現地観測は多くの人々によってなされており、また堤設置による地形変形についての実験や現地観測についても多数の報告がなされている¹⁾。しかしながら、堤背後における海浜地形の形成に重要な役割をはたすと考えられる波による平均的な流れ (wave induced currents) についての研究は極めて少ない。わずかに透過性堤体については堀川・小泉 (1974)²⁾、不透過性堤体については川口・杉江³⁾ (1972) によって、その二、三の特性が言及されているにすぎない。

最終的には透過性離岸堤周辺の波高分布と流れの場とを量的に求め、流れの場と海底地形 (sea bottom topography) の関係より、離岸堤による海岸変形を予測する計算手法を確立することを目的としているが、本研究はまずその第一段階として、離岸堤が不連続島堤形式に配置されている場合の堤背後および開口部における流れの特性について、固定床 Plane beach の実験によって検討

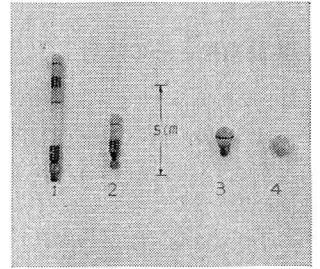


図—1 堤体配置図

なされている。実験結果は堤内の波高分布と流れと底質の移動の関連性を明確に示している。

実験装置および実験方法

実験装置：実験に用いられた水槽は幅 1.0 m、深さ 0.5 m、長さ 11 m のコンクリート製造波水槽である。水槽の一端にはフラッター型造波装置があり、造波板の前には wave filter がある。水槽の他の一端には、汀線より沖側に 1/30、岸側に 1/10 の複合勾配の模型海岸がモルタルで作られている。波高は水槽の側壁上のレールを走行する台車に装備された容量式波高計で測定された。流れの測定は浮子および染料 (ウランin、ローダミン、ウォーターブルー) の運動を水槽上に仮設された高さ約 3 m の足場上より、35 mm モータドライブカメラおよび 16 mm メモモーションカメラで撮影するラグランジェー風の方法でなされた。実験に用いられた浮子は写真—1 に示されている。1, 2 の浮子は平均的な流れを測定するためのもので上端が約 5 mm 水面上に露出するように重さが調整されている。3, 4



写真—1 浮子

の浮子は底層の流れの測定用のもので重さは、水道水では沈むが 2% 食塩水では浮くかまたは中立を保つように調整されている。模型離岸堤体として、18 mm のガラス球を詰めた厚さ 7 cm の鉛直籠が用いられた。

実験条件：実験に用いられた波は 1 種類で周期は 1.0 秒である。図—2A にて×印に示されるように (無堤時に) 汀線より沖合、 $X=5\text{ m}$ で観測される波高は $H=8.5\text{ cm}$ である。これより微小振幅波理論にて示される沖波波長 $L_0=156\text{ cm}$ 、沖波波高 $H_0=9.2\text{ cm}$ 、 $H_0/L_0=0.059$ となり、実験に用いた波は侵食性の高い荒天時の特性を持つと考えられる。砕波点は $X=3.5\text{ m}$ である。ある波の峯が砕波点にあるとき、次の峯の位置は $X=4.55\text{ m}$ 、すなわち砕波する直前の波長は 105 cm である。 $X=4.0\text{ m}$ の水深 $d=13.3\text{ cm}$ を与えて計算される波長は $L=106\text{ cm}$ 、実測値は計算値に一致する。図—1 に示

* 正会員 工修 都立大学工学部土木工学科助手

される領域Aは実験水槽の幅, $l=100$ cm 故, 領域Aと波長はほぼ同じ大きさである。従って, この実験は開口幅と波長の比が約0.5~0.1, 堤の長さと波長の比が0.5~0.9に変化する実験である。

堤体は砕波点である $X=350$ cm と砕波点よりわずかに岸側の $X=300$ cm の位置に設置された。今, この実験を長さの縮尺が1/50の模型と考えると, 例えば $X=350$ cm に堤体が設置された場合は現地では, 沖合 175 m, 水深約 5.8 m の地点に堤体が存在することになる。この状態は detached breakwaters というより offshore breakwaters の状態である。

実験方法: 実験は次の手順でなされた。(1) 3台のセンサーを用いて波高分布の測定, (2) 浮子による流れの観測, 棒浮子は水槽を横断する2本の支持棒の上に10 cmの間隔で並べられ, 支持棒より同時に水中に落下された。球浮子は適宜投入された。35 mm カメラによる観測は2回(36枚取フィルム2巻)なされた。撮影間隔は最初10枚までは1秒, 残り約25枚は5秒である。16 mm カメラでは2秒間隔で数分なされた。(3) 染料による流れの観測, 35 mm, 16 mm カメラいずれも2秒間隔での撮影である。(4), (3)の終了後, 一たん水を抜き, 堤外側および堤内側3区間, 計4区間に分けて, それぞれ色の異なったけい光染料で着色した豊浦標準砂を薄く敷き, 流れと砂移動の関連性についての実験がなされた。

実験結果とその検討

堤内の波高分布: 図-2A, B は開口部の中心線, C, D は堤体の中心線(実験では側壁)に沿う波高変化を示したものである。図-2A, B にて開口部の波高をみると開口部が狭くなったとき ($l'/l=0.1, 0.2$) 侵入する波高は小さくなる。特に $l'/l=0.1$ のとき $l'/l=0.3, 0.4, 0.5$ の場合の概略1/2である。これは堤前面の波の状態に起因すると考えられる。すなわち堤体より反射した波が開口部の沖側の領域に散乱侵入し, 結果として重複波を生じせしめ, 開口部に至る波の波高を減ずるものと考えられる。堤体前面における波長は約105 cm であるから, 開口幅と波長の比がおおよそ0.2以下になると開口部に侵入する波高が堤体の影響を示すようになる。同じ図A, B にて l'/l の値にかかわらず, 堤体よりほぼ1波長陸側に ($X/X_0=1.0$ のとき $X=2.5$ m, $X/X_0=0.86$ のとき $X=2.0$ m) 著しく波高を減ずる部分がある。図-2C, D をみると対応する地点は波高の高い部分である。図-3 は $X/X_0=1.0$ の場合の波高分布図である。波高は開口部の中心線に対して対称の地点は実験誤差内で等しいので, その平均値で示してある。図は無次元表示をしてない。図-2と図-3は堤内が汀線に平行な方向にも, 垂直な方向にも定常波になっていることを示す。

この波高分布が流れの場の形成および底質の移動に関

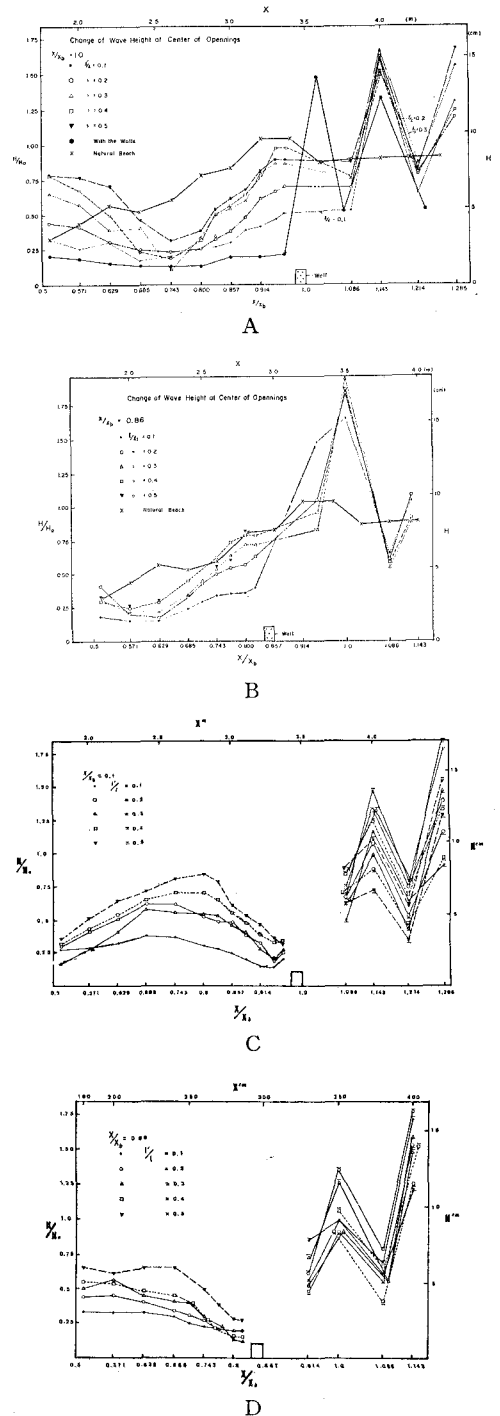
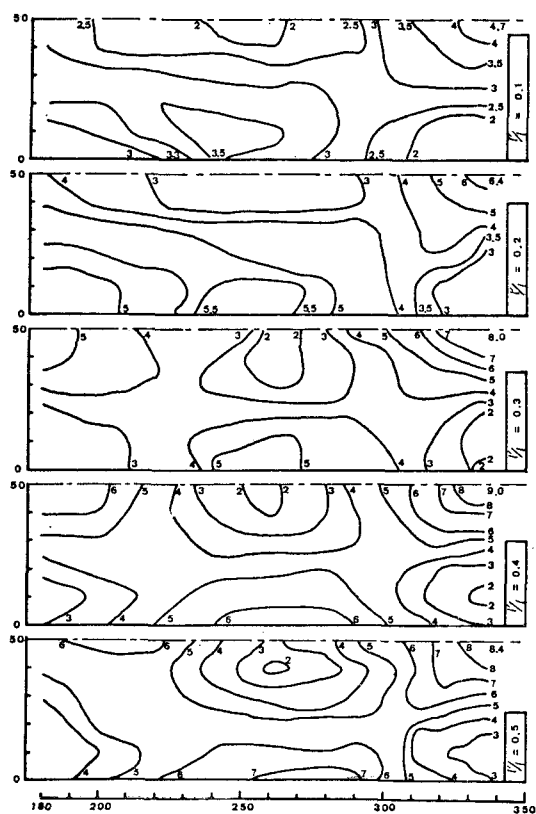


図-2 波高変化

連するのが後に示される。図-3の $l'/l=0.3, 0.4, 0.5$ にて示されるように開口部の幅が広がったとき開口部に侵入した波は堤体に平行な方向にも波高を減ずる。 $l'/l=0.5$ のとき, 開口部堤体近くの波高は中央部の約1/2となっている。



図—3 波高分布図

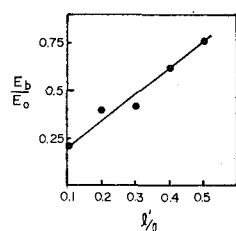
堤内に輸送されるエネルギーは開口幅と波の特性と透過性堤体の水理特性に関係する。単位面積当りの海面のエネルギー密度は

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

で表わされる。故に面積 A なる海面の総エネルギーは

$$E_A = \frac{1}{8} \rho g \sum_{i=1}^n \Delta A_i H_i^2$$

今、波高分布を示してある堤内の領域の総エネルギーを



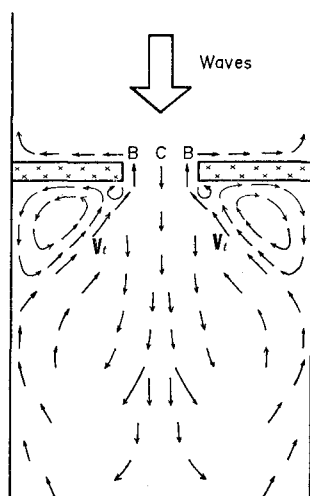
図—4 堤内に輸送されるエネルギー

E_0 , 堤体が存在しないときの同領域の総エネルギーを E_0 とし, E_b/E_0 の比を示したものが図—4である。図—4は, 堤体の水理特性, 波の特性が一定のとき, この実験範囲内では堤内に輸送されるエネルギーは l'/l に比例することを示す。

堤内の流れについて、堤内の流れの場の基本的な型は図—5に示されている。堤体の開口部端、陸側に円矢印で示してある流れは波の峯が通過するときに生じる渦によるものでいわゆる局所洗掘を生じせしめる流れである。

堤背後中央部より陸側に流れ、途中で方向を転じ開口部に向う流れ (v_i に沿って) が存在する。この流れは堀川・小泉 (1974) の実験では指摘されていない。

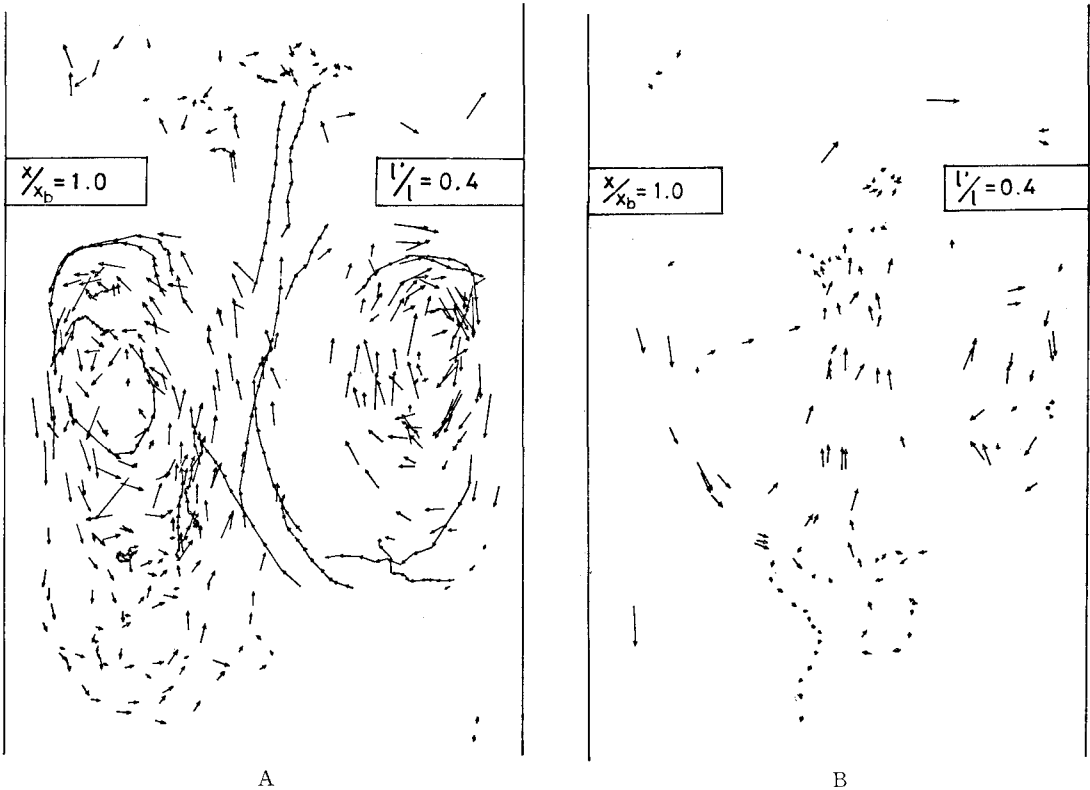
この流れを生じせしめる原因は堤体を透過してきた水の实质であり、従って、この開口幅が小さくなると、この流れの生じる領域は大きくなる。図—5で矢印



図—5 流れの基本図

v_i にて示される開口部に向う流れが存在する。この流れは開口部の点 B で示される地点より強く堤外に流出する。これは開口部の中央部では図—3に示すように波高が高く、また波高が低くても堤体は流れに抵抗し、従って開口部の堤体の先端に流れが集中すると考えられる。この流れは開口幅が小さくなると ($l'/l=0.1, 0.2$), 棒浮子では観測することが難しくなる。すなわち、開口部より棒浮子が堤外に流出しようとするとき波峯で堤内に戻されるからである。しかし、染料による観測では明らかに開口部よりの流れの流出が認められる。すなわち中底層部に冲向きの流れが存在することを示している。現在の段階でのデータ解析では量的に示すことができないが、観察によると $l'/l=0.2$ を境にして、それより小さい l'/l では堤背後に生じる流れが堤内の流れの主役を演じるようである。図—6は流れの観測例を示す。Aは棒浮子による平均流、Bは球浮子による底層の流れを示す。A, Bの図より、底層と棒浮子で示される流れはほぼ一致するようにみえる。図—6Aでは、図—5C点より流出しようとした浮子が波峯に接したとき堤内にもどされ、堤背後の流れに入ったベクトル例が多く見られる。

表—1は35mmカメラによる浮子追跡および染料追跡より得られた開口部の流れを示す。 v_0 は棒浮子によるもの、 v_{0b} は球浮子による底層の流れである。最大は観測された最大値、 v_{0m} は観測され値の大きい方から5ないし4個のデータの平均である。観測されたデータが3個以下のとき平均は示してない。 $X/X_0=0.86$ の場合データのバラつきが多い。しかし、染料より得られる v_0 の大きさは $X/X_0=1.0$, $X/X_0=0.86$ の場合も l'/l にかかわらずほぼ $3 \sim 4 \text{ cm/sec}$ の大きさである。 $X/X_0=1.0$ のとき棒浮子によって得られた v_{0m} は l'/l にかかわらず 6 cm/sec 程度である。棒浮子による v_{0m} が染料によ



図—6 流 れ の 実 測 図

表—1 開口部の流速

X/X_b	l'/l	v			v_{0b}	
		v_{0m}	最大	染料	平均	最大
1.0	0.1	6.0	10.0	3.3	1.1	1.8
"	0.2	5.9	8.0	3.3	1.6	1.8
"	0.3	6.6	10.0	3.3	1.8	2.4
"	0.4	5.3	5.8	5.5	2.5	3.1
"	0.5	4.2	5.0	2.0	1.8	2.2
0.86	0.1		20.0	3.0	1.7	2.6
"	0.2		2.7	3.4		0.7
	0.3		2.0	3.2	6.3	7.6
	0.4		11.0	3.4		5.0
	0.5		11.0	5.0	5.4	6.6

の流速のほぼ 2 倍になる。 $X/X_b=1.0$ のときの v_{0b} の大きさは l'/l にかかわらずほぼ 2 cm/sec の大きさである。 $X/X_b=1.0$ に限り、開口部の平均的な流れは l'/l によらないようにみえる。実験条件で述べたように、この実験を現地の 1/50 と考え、フルードの相似則に従えば、

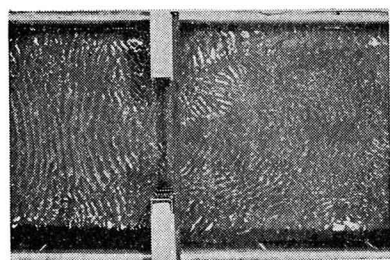
$$v_p = v_m \sqrt{L_p/L_m} = v_m \sqrt{50}$$

より、棒浮子の v_{0m} 6 cm/sec, 最大 10 cm/sec を考えても、現地では 40 cm/sec, 70 cm/sec 程度となる。この実験に相当するような現地データは見当たらないが、40~70

cm/sec オーダーは堀川・佐々木等 (1976, 1975)⁴⁾ による一連の海浜流の現地観測では、砕波波高 2 m 程度でも度々観測される大きさである。

底質移動について、堤外の底質は堤体を透過して、堤内に移動した。 $X/X_b=1.0$ の場合にはいかなる l'/l においても開口部で底質が堤内側に移動することはなかったが $X/X_b=0.86$, $l'/l=0.2, 0.3$ の場合に限り開口部からも底質の堤内側への移動がみられた。これは、たまたまこのケースでは開口部前面で砕波が生じ、この砕波によって底面に岸向きの流れが生じ、掃流形式で堤内に移動されたものである。 $X/X_b=0.86$ の場合、前面で砕波した波が堤体に激突するため、 $X/X_b=1.0$ の場合に比べて前面の底質が浮遊しやすく、堤内への底質の移動がすみやかに生じた。透過性離岸堤の場合の堤外の底質の堤内への移動は、浮遊の状態で堤体を通過することは豊島 (1972)⁵⁾ によって指摘されている。

写真—2 は底質移動の例を示す。この写真より次の二点が指摘できる。第 1 は底面の砂澁の方向が流れの方向を示すこと。特に v_i が発生している部分の砂澁が開口部に向いているのが興味を引く。第 2 の点は、開口部より陸側約一波長の地点にある波高の小さい部分、すなわち、定常波の節になっている部分では底質の移動はなく、この部分に底質が堆積する。この定常波の節の部分に底



写真—2 底質移動図

$$X/X_b=1.0$$

$$l'/l=0.5$$

で示される式に $\bar{z}=0$, 観測値 $\bar{H}=0.3$, $T=9.0$ と $h=3.5$ を与えて, 開口部表面における輸送速度を求めてみると $\bar{u}_s \approx 0.12 \text{ m/sec}$ となる. 図—7 より求められる速度は $\bar{u}_s=0.1 \text{ m/sec}$ である. 実測値と計算値は概略一致する. 汀線に沿う砕波帯では rip currents の存在が認められ (例えば A 点) 質量輸送の平衡が理解されるが離岸堤内全体を考慮するとき, 質量輸送の平衡の径路はこの観測で明らかではない. 荒天時の観測が望まれる.

結 語

得られたデータにかなりの未解析の部分があり, 波高分布や流れについて, 量的な検討は不十分であるが 2, 3 の特性は明らかにすることができた.

参 考 文 献

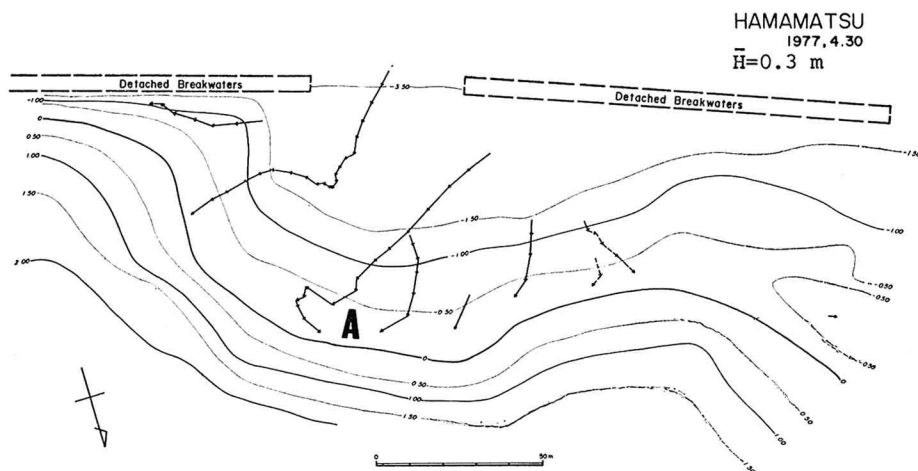
- 1) 土木学会海岸工学委員会: 海岸工学講演会講演論文集目録, p. 8 離岸堤, p. 12 透過性構造物, 1974.
- 2) 堀川清司・小泉千稔: 離岸堤の機能に関する実験的研究報告書, 東京大学工学部土木工学科港湾研究室, 1974.
- 3) 川口 毅・杉江正文: 離岸堤の配置に関する研究, 第19回海講演文集, pp. 77-81, 1972.
- 4) 堀川清司・佐々木民雄, その他: 海浜流に関する研究(第4報), 第23回海講演文集, pp. 365-370, 1976, (第3報) 第22回海講演文集, pp. 127-134, 1975.
- 5) 豊島 修: 現場のための海岸工学, 侵食編, 森北出版, pp. 227-317, 1972.
- 6) Herbich, J. B. and Ko, S. C.: Scour of sand beaches in front of seawalls, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng., pp. 622-643, 1968.
- 7) Hotta, S. and Marui, N.: Local current and scour around porous breakwaters, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 1590-1604, 1976.

質が堆積する事実は不透過海岸堤防の二次元洗掘実験で Herbich and Ko (1968)⁶⁾, 透過性離岸堤の二次元洗掘実験で Hotta and Marui (1976)⁷⁾ によって指摘されている.

離岸堤周辺の流れの現地観測

1977年4月30日に天竜川河口右岸にある離岸堤周辺の観測例が図—7 に示されている (図中の等深線 0 は 12 時の汀線である). 12 時 30 分頃開口部中央に箱尺を立て離岸堤端より 100 波程度目測した平均波高は約 0.3 m, 周期は約 9 秒であった. 開口部より侵入した波は十分に回折し汀線に平行に一回の砕波で岸に達し, また離岸堤よりの透過波高は認められない. 非常に静穏な状態で実験に認められるような流れは存在しない. 観測日以前の荒天時の波浪と流れによって定まった地形に当日の波が適応していると考えられる. 観測された流れの方向はほぼ波峯の進行方向に沿い, 波の質量輸送によるものと推定される. ちなみに, 微小振幅波理論の第 2 近似で表われる波の進行方向への流体実質の輸送速度

$$\bar{u} = \frac{a^2 \sigma k \cosh 2k(\bar{z} + h)}{2(\sinh kh)^2}$$



図—7 現 地 観 測 図