

高知港口付近の漂砂に関する実験的研究

上 森 千 秋*・玉 井 佐 一**・亀 松 睦 弘***

1. 緒 言

高知港は土佐湾のほぼ中央部にある浦戸湾の湾奥にあり、外海から遮断され非常に静穏である。しかし港口付近は図-1に示すように屈曲がはなはだしく、航路幅員が狭い。さらに外海に面する部分は台風および低気圧通過時に非常に強大な波浪をうけ、航路保持に苦慮している。また東西には物部川、仁淀川からの大量の流送土砂の供給によって形成された漂砂浜が連なり、とくに港口付近は西方約 8 km の仁淀川より吐出される土砂の漂砂圏にあり、強大な波浪と相まって漂砂移動はきわめて激しく、港口の埋没および付近の地形変化がはなはだしい。

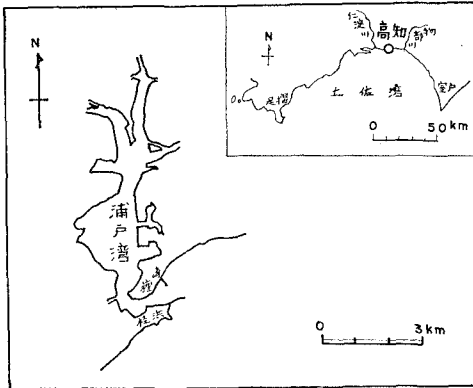


図-1 高知港平面図

元来高知港口は桂浜竜王岬の遡へい下にあるが、その後防波堤の築造延長によって激しい漂砂は港口付近の航路に滞積しやすい条件にある。

このような現況において高知港整備計画にのって、将来 1 万トン級船舶の入港を可能にするため、桂浜防波堤の延長と堤内航路をしゅんせつした場合、この航路の安全性の確保はきわめて重要な問題である。

したがってこの研究は港口付近の現地調査資料をもとに、三次元模型によって漂砂の廻り込みによる航路埋没機構を解明し、防波堤延長による埋没防止効果を見出す

とともに、現在発生している種崎海岸の侵食についてもその機構や対策を考究することを目的とした。またこの実験では移動床模型によるとともに、実験対象範囲の広さと、実験施設の関係から縦横の縮尺をかせ、ひずませた模型によって行なったが過去の現地資料をもとに、その再現性を検討し比較的良好な結果をうることができた。

2. 実験設備および実験方法

(1) 実験設備

実験は長さ 20 m、幅 10 m、水深 0.5 m の平面波浪水槽を用い、波はフラップ型造波機によって起こした。現地模型は予備実験の結果から水平縮尺 $n_L=1/200$ 、鉛直縮尺 $n_h=1/50$ とし、掃流力的な粒径相似は満足されないが中央粒径 $d_{50}=0.28\text{ mm}$ および 0.19 mm (ともに比重 2.66) の均一な二種類の海砂でもって現地の調査範囲内の海浜地形を作製した。

また桂浜防波堤および種崎防砂突堤はコンクリートブロック壁を用い、水槽側壁からの反射波の影響が入らないよう消波わくを設けた。

(2) 実験方法

実験は次のような内容および方法によって行なった。まず 1) 現地の模型への再現性を検討し、ある程度の定性的傾向の追従性を確立し、次に 2) 桂浜防波堤に沿って -10 m までしゅんせつした場合、防波堤の長さによる航路埋没状況および種崎海岸の地形におよぼす影響を調べ、さらに 3) 種崎海岸へ離岸堤を施工した場合の海岸侵食防止および航路への影響を調べた。

1) については過去の現地調査資料から、昭和 35, 37, 39 および 43 年の地形をとりだし、まず 35 年の模型地形を作った。これに岩垣・野田によって示された¹⁾ 海浜の侵食、滞積性の限界を表わす $H_0/L_0 \sim H_0/d_{50}$ の曲線から種崎海岸の海浜形状を考慮して $H_0/L_0=0.024$ と定め、これに相当する規則波を作用させて現地地形と比較しながら trial な検証過程によってその再現性を検討したうえ、模型波の周期、波高、さらに地形変化の time scale を見出すようにした。なお桂浜防波堤および種崎突堤はその築造年次の時点に合せて設置するようにした。また現地と模型とで蛍光砂を用いて漂砂の移動について比較考察した。なお海浜地形変化は現地深浅測量時の 38 測線 (測線間隔 50 m) のうち、図-2 に示す J, F, B,

* 正会員 農博 高知大学教授 農学部

** 正会員 高知大学助教授 同

*** 学会員 高知大学大学院

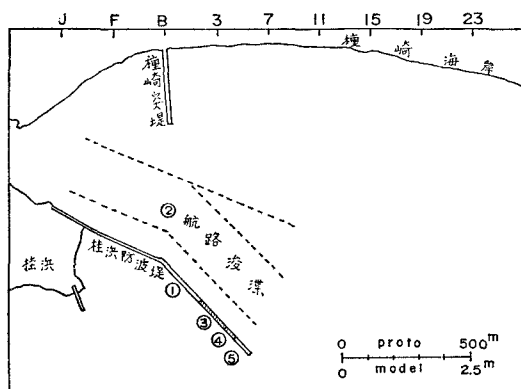


図-2 実験平面図

3, 7, 11, 15, 19 および 23 の各測線 (現地間隔200m, 模型では1m) について一定時間ごとに測定台上に設置した point gauge で測定した。

2) については 昭和43年11月時点の桂浜防波堤長さ (先端水深8m) から実験を始め, これより110m延長した場合 (昭和45年度計画完工時点先端水深10.5m), 190m延長した場合 (先端水深12.5m) さらに新5カ年計画として260m延長した場合 (先端水深約14m) の4つのケースについて航路をしゅんせつし, 地形変化の測定結果から, 防波堤の効果および種崎海岸におよぼす影響を調べた。

3) については, まず種崎海岸におけるもっとも侵食の著しい箇所に離岸堤を設置し, その効果および他におよぼす影響を調べた。離岸堤は昭和45年計画現況においてトラフの岸側沿いに汀線に平行に測線 No. 21, 17 および 15 を中心として 400m1本とさらに 300m3本設置した場合についてその効果を考察した。上記2) についての実験順序を図-2 に示した。なお入射波および回折波の測定は, 防波堤先端を中心に模型で50cm間隔にネオン管式波高計で測定した。

3. 現地の模型への再現性および底質移動

(1) 再現性について

このような移動床模型実験については漂砂移動に対する力学的相似性が確立されていない現在, 現地の模型への再現性が特に重要な問題である。したがって筆者らはまず過去の調査資料をもとに, その再現性を検討した。模型において昭和35年2月の測定地形から出発して, これに波向 SE, 周期 $T=1.4$ sec, $H_0=7.3$ cm (現地 $T=9.9$ sec, $H_0=3.65$ m に相当) の波を継続作用させ経時的な地形変化をみると現地における経年変化がほぼ再現されることがわかった。実験の4時間後の地形と昭和37年9月の現地地形, 実験8時間後と39年8月の現地地形および16時間後と43年11月現地地形を各測点で

横断的に比較したものが図-3 (37, 39年省略) 平面的に比較したものは図-4である。現地における海浜地形は測量前の海面状態に著しく左右され, また各成分をも

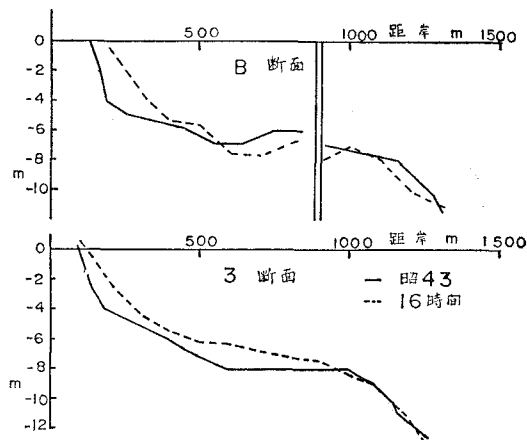


図-3 現地と模型との比較横断面図

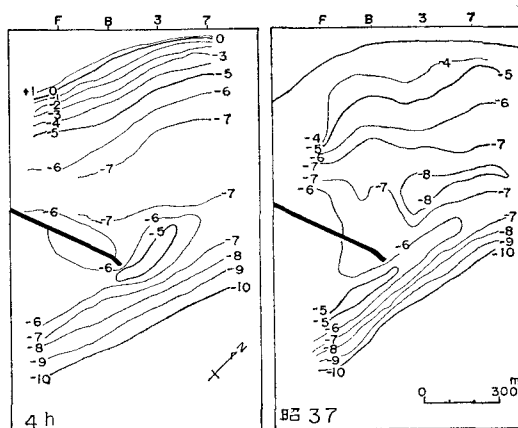


図-4 (a) 現地と模型との比較平面図

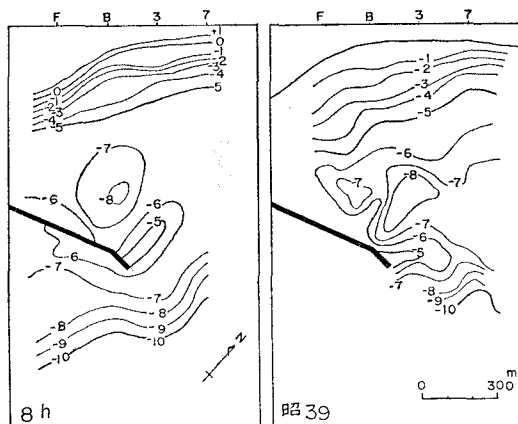


図-4 (b) 現地と模型との比較平面図

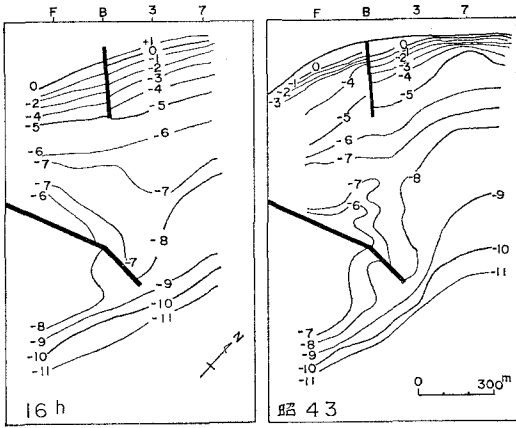


図-4 (c) 現地と模型との比較平面図

つ不規則な波が作用するので、規則波で形成される実験地形とは必ずしも一致しないことが考えられるが実験結果はかなりよく現地を再現している。とくに種崎に防砂突堤が築造されてから後に、その地形の再現性がよいことが見られる。

このようなひずませた移動床実験による現地の再現性について Reinalda²⁾ は Thyborøn 水路の閉塞地形に関する実験 (水平縮尺 $n_l=1/250$, 鉛直縮尺 $n_h=1/40$) で非常によい結果を得ている。また最近鹿島港の埋没に関する運輸省港研の佐藤らの研究³⁾ ($n_l=1/200$, $n_h=1/40$) はとくにこのような実験の再現性を検討し平面的な地形変化についてよい再現性を得ている。

しかし港内滞積土量についての再現性は悪いようである。筆者らも同様に現地深浅測量結果と模型実験結果から No. 3~7 間の変化土量を比較すると表-1 でその再現性は必ずしもよくない。もちろん期間内には航路のしゅんせつや港口付近の砂採取等の影響が十分考えられる。

表-1

年	現 地 (m ³)	実 験 (m ³)
37~39	+ 2 760	- 3 920
39~43	- 1 054	- 8 680
43~44	+ 14 652	+ 9 240

(+) 滞 積 (-) 侵 食

なおこのような再現性は港口付近の砂移動と碎波帯付近の砂移動の両者について満足することは困難であろうし、また人工的に航路を掘削した場合の埋没に関する相似性については不明であるが、一応の再現性が満足されるものとして本実験を行なった。これについては現地航路をしゅんせつしてその埋没状況を調査する予定であり、その再現性も検討できよう。

(2) 底質移動

現地と模型とで蛍光砂を投入し漂砂移動について考察した。桂浜防波堤先端付近 (-9 m) における調査は現地においては 44 年 8 月 30 日投入し、1 週間後および 1 カ月後に採取分析を行ない、実験においては 43 年 11 月時点の地形に投入して造波 1, 2, 3 および 4 時間後に採取分析を行なった。

使用蛍光砂は、いずれも投入地点と同じ粒径のもの (現地 $d=0.3\sim0.6$ mm, 模型 $d_{50}=0.28$ mm) を使用した。現地におけるこの期間の波は SE~SSE 波が多く 9 月 25, 26 日台風 11 号によって $H=3\sim4$ m, $T=12$ sec の波が 1 両日卓越したのみで、他は比較的静穏であった。したがって波の作用力は実験の方がきわめて大となる。しかし一方掃流力的な相似からすると実験の方が底質粒径が大きく、動き難いので底質移動の難易度 (限界摩擦速度) はかなり近似していると見なされる。蛍光砂の等粒数線を比較すると図-5 のようで、実験における砂移動の方が激しいが、4 時間後と現地のそれとは比較的類似した分布をしている。

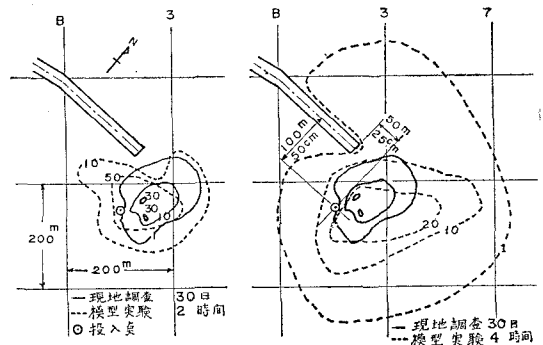


図-5 蛍光砂の移動 (桂浜防波堤先端付近)

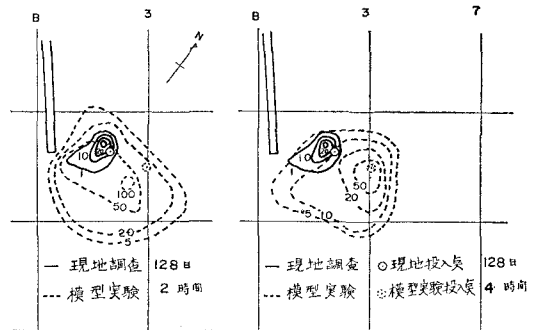


図-6 蛍光砂の移動 (種崎防砂突堤付近)

種崎防砂突堤付近における調査は 44 年 1 月 22 日投入し、最終採砂は 128 日後に行なった。この期間の波は不明であるが、実験と対比すると図-6 のようで傾向はか

なりよく似ている。このような点から定量的な論議は別として、砂移動の傾向は実験の蛍光砂の分布から推定することができよう。すなわち桂浜防波堤先端付近の漂砂は、その付近を不定方向に移動しているが、時間の経過とともにだんだん防砂堤の遮へい域(航路内)へ廻り込む。また種崎防砂堤先端付近の漂砂は防波堤から沖の方へ引かれ、徐々に港口の方へ移動して、いずれも航路埋没に影響する傾向にある。しかしこれらは全面移動の形式で行なわれ、大きな地形変動に働くとは考えられない。

4. 防波堤の効果

(1) 昭和43年11月地形における実験(Case 1)

昭和43年11月の深浅測量地形がもっとも新しいので、これを現況と見なし、これに2カ年に相当する波(4時間)を与えてその地形変化を調べた。図-7は43年11月の現況地形であり、図-8が4時間後の地形であ

る。これによると種崎防砂突堤から(測点B)西寄りではほとんど変化は見られないが、桂浜防波堤の遮へい域からはずれると地形変化が起こり、とくにNo.7沖800m付近にsand ridgeができ、また波高が増大し航路障害が考えられる。

桂浜防波堤による航路内の波の変化状況を実験時の屈折、回折実測波高と入射波高との比 $H/H_i = K_r \cdot K_d$ を見ると図-9 のようである。これによると種崎突堤沖では $K_r \cdot K_d \div 0.5$ となり、かなり減衰しているが、種崎突堤より東寄り(No.7)の沖では $K_r \cdot K_d > 1.0$ となり漂砂移動が激しいことが推察され、地形変化とよく対応している。運輸省第三港建で行なったひずませた固定床($n_f=1/140$, $n_h=1/90$)実験⁴⁾(SSE波)においても同様の結果を得ている。

(2) 昭和43年11月地形で航路しゅんせつした場合(Case 2)

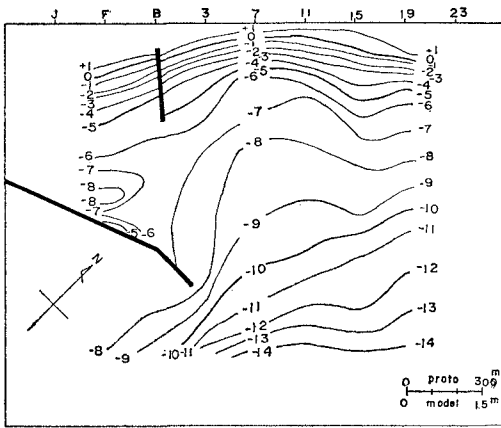


図-7 昭和43年11月初期地形

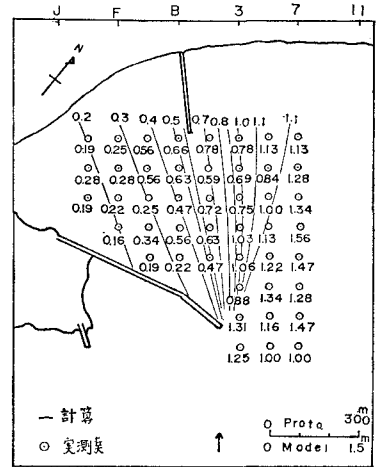


図-9 回折図および $K_r \cdot K_d$ 実測値

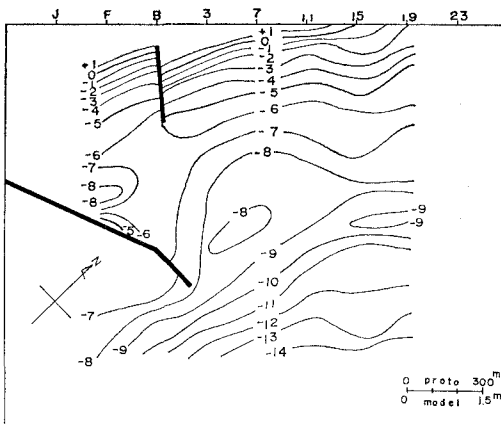


図-8 造波4時間後の地形(Case 1)

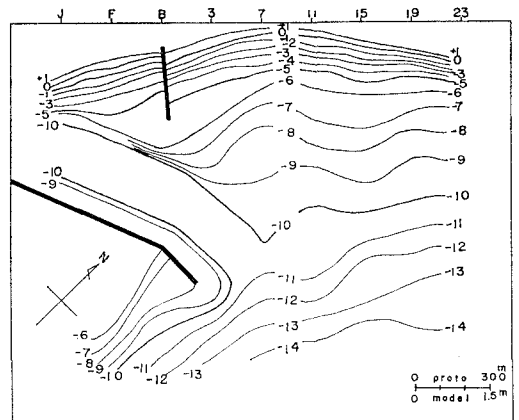


図-10 航路しゅんせつ初期地形

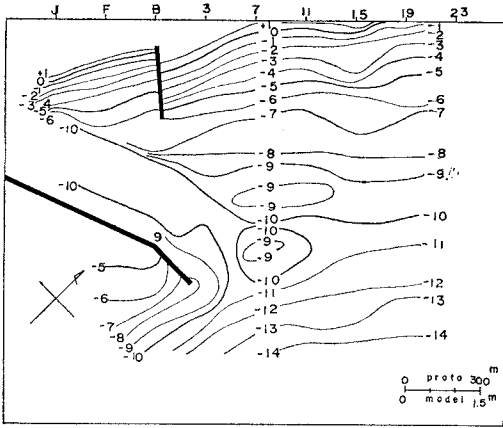


図-11 造波4時間後の地形 (Case 2)

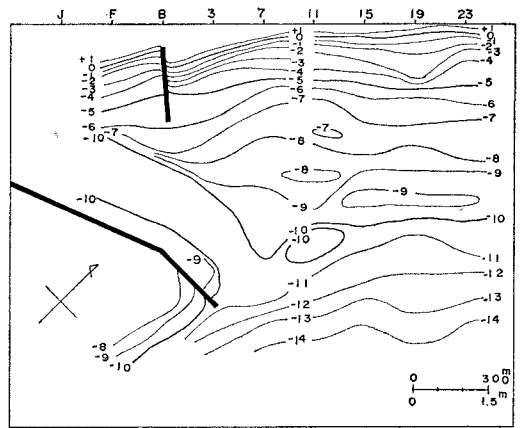


図-13 防堤波を110m延長し造波時間後の地形 (Case 3)

桂浜防波堤を昭和43年11月時点の長さで、航路を-10m しゅんせつした場合が図-10で、2年経過後(4時間)の航路付近の地形変化は図-11に示すようである。すなわち蛍光砂による漂砂移動によって証明されたように漂砂は防波堤先端を廻って航路を埋没させる。さらに航路しゅんせつ前と同様 No. 7 線上沖合へ滞砂を生じ、波高も増大して航路障害となる。地形の鉛直変動図を描くと図-12 のようで漂砂の移動は、二次元的なバランスはとれてなくて、三次元的移動がかなり考えられる。しゅんせつ航路内 No. 3 ~ 7 間の埋没土量を現地に換算すると 21 000 m³/year であった。

(3) 防波堤 110 m 延長した場合 (昭和 45 年度計画) (Case 3)

昭和43年11月時点から防波堤を110m延長し-10mまで航路をしゅんせつして、2年経過した後の地形変化

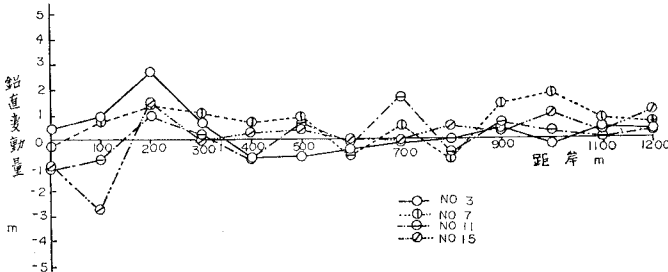
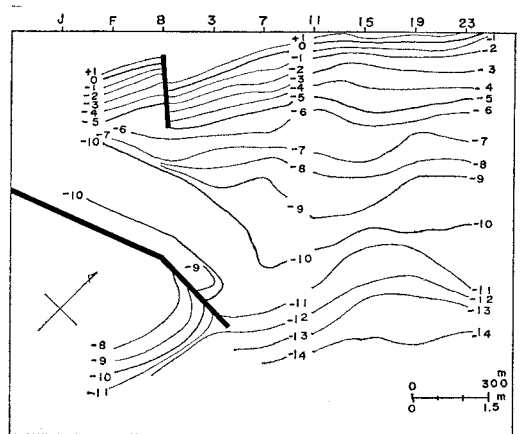


図-12 各断面の地形鉛直変動量 (Case 2)

は図-13に示す。これからわかるように桂浜防波堤の先端を廻る漂砂による航路埋没はかなり減少している。また No. 7 から東で起こっていた汀線侵食がかなり減じ侵食位置が東よりへ移動している。また前の実験 (Case 2) でみられた No. 7 沖の滞砂も東へ移動し No. 11 の沖合にみられる。すなわち汀線から 400m, 600mお

図-14 防波堤を190m延長し造波4時間後の地形
(Case 4)

よび 800m 沖に滞砂は発生するが、その規模はいくぶん小さい。この場合の No. 3 ~ 7 間の航路埋没土量は 7 500 m³/year で防波堤延長効果が表われている。

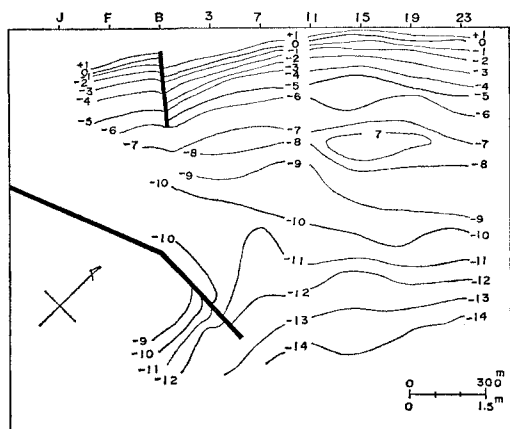
(4) 防波堤 190 m 延長した場合 (Case 4)

昭和45年完工時点よりさらに防波堤を80m延長した場合(先端水深12.5m, 新5カ年計画へいたるまでの中間時点)について-10m航路の埋没防止効果に

ついて、2年後の地形変化をみると図-14のよう No. 7 測線上 900m, 1 100 m に滞砂を生じる。航路内 No. 3 ~ 7 の埋没土量も 3 700 m³/year と減少している。

(5) 防波堤 260 m 延長した場合 (新 5 カ年計画) (Case 5)

昭和43年11月時点より防波堤を260m延長した場合の-10m航路の埋没防止効果に関する実験結果について

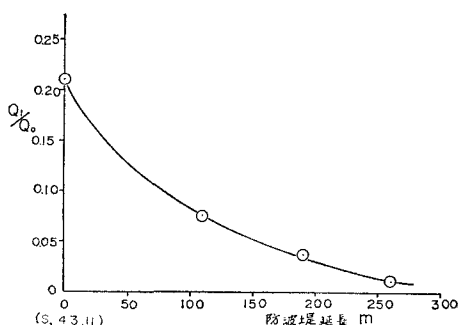


図一15 防波堤を260m延長し造波4時間後の地形
(Case 5)

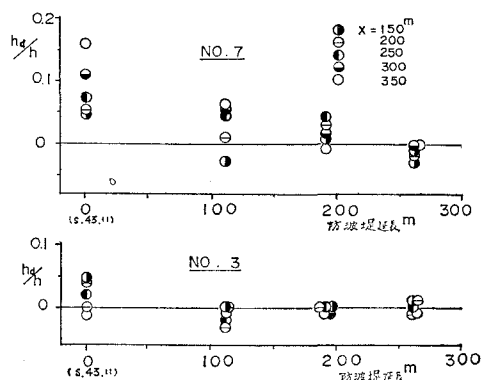
2年後の地形変化を見ると図一15のようである。前ケースの図一11および13の地形と比較すると地形変動が少ないことがわかる。すなわち防波堤の遮へい域が増大し、航路付近の漂砂移動はきわめて少なくなり、航路埋没防止に効果をあげている。ただ測点 No. 15 沖 500 m に滞砂が生じる。汀線の侵食位置は防波堤の延長によって東進する傾向にある。この場合の埋没土量は $2100 \text{ m}^3/\text{year}$ ときわめて少ない。

以上防波堤の効果について述べてきたが、昭和43年11月時点における防波堤長で航路をしゅんせつした場合、漂砂は防波堤先端を廻って航路内に侵入する。

また遮へい域外の地形も複雑となり Bar の発生などが見られる。さらに計画案にしたがって 110 m, 190 m と逐次防波堤を延長すると航路内の埋没土量は漸次減少するが、遮へい域外の Bar は消滅せず、むしろ増大する傾向にあり、入港船舶の航行障害となるとともに、これによる波高の増大にともに注意が必要である。このような防波堤延長にともなう航路内 No. 3~7 間の埋没土量 Q_i と航路しゅんせつ土量 Q_0 との比を示すと図一16



図一16 防波堤延長に伴う No. 3~7 間の埋没土量変化



図一17 防波堤延長に伴う No. 3 および 7 断面の滞積高の変化

のようになり、その減少の傾向がよくわかる。

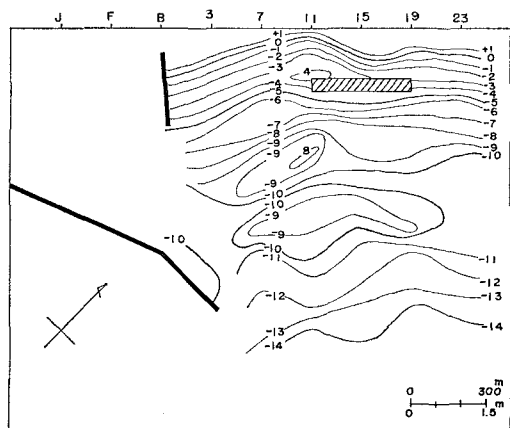
また防波堤法線と測点線上との交点を $x=0$ とし、その線上の滞積高を h_d 、初期水深を h として、防波堤延長にともなう h_d/h の変化を見ると図一17 のようである。図から No. 7 断面では x の値が小さいものほど h_d/h の値は大きく地形変化の著しいことがわかる。No. 3 断面ではむしろ逆の傾向を示し防波堤より離れた地点ではほとんど地形変化はなく、防波堤に近い地点では漂砂の廻り込みによる影響が表われている。このような現象は No. 7 断面で防波堤 190 m 延長の時にも見られ、防波堤先端を廻り込む漂砂の傾向がうかがわれる。

また防波堤の延長によって遮へい域も拡大し種崎海岸 No. 7 以西の汀線侵食もほとんどなく航路埋没防止とともにその効果をあげているが、この地域内の漂砂移動が東から西へ向い、また防波堤先端以東のいわゆる遮へい域外 (No. 7 以東) の海岸については、西から東への漂砂移動が発生する。したがって防波堤の延長にともなう侵食位置が東へ移行する。

このような傾向が模型の規模の影響によるものかどうかは明らかでないが、今後検討を進める考えである。

5. 離岸堤の効果

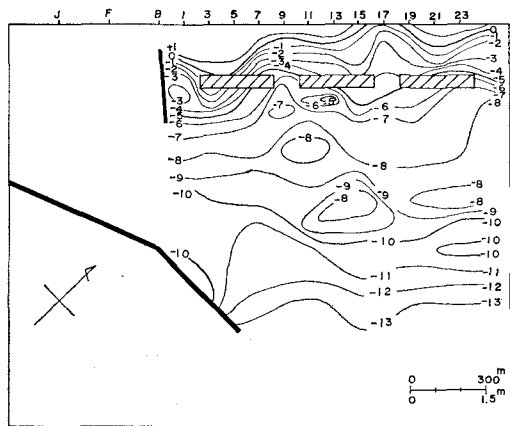
昭和43年11月時点の地形に防波堤を45年末まで施工し、これを原形として測点 No. 21, 17 および 15 に中心をもつ延長 400m (模型 2m) の離岸堤を1本設置した場合について種崎海岸の侵食防止効果を検討した。使用ブロックは 33 t/個 (模型重量 264 gr/個) のものを4列3段積とした。設置位置は水深 -2 m ~ 5 m で、離岸堤頂は平均海面上約 1 波高静水面上にある。これらの効果について No. 15 に中心をもつ場合の2年経過後の地形を見ると図一18 のようで一般に離岸堤設置によってその前面地形が複雑となり、sand bar が多く発生するようになる。離岸堤背面には tombolo ができるが汀線



図—18 離岸堤の効果

付近は初期地形にくらべ侵食される。とくに離岸堤の遮へい域外の侵食が著しい。しかしこれを45年度防波堤施工時点で航路しゅんせつ2年後(Case 3)にくらべると、全般的には汀線が前進し、背面においては若干の効果がある。一方沖地形の複雑化は、離岸堤の両側から沖へ向う流れと離岸堤からの反射波によるものである。これは入港船舶の航路筋にあたり障害となる。

以上の傾向は離岸堤位置が変わってもほぼ同様で設置位置による防砂効果の差は明確ではない。次に離岸堤を三基設置してその効果を検討した。離岸堤の設置は昭和48年相当(Case 5)の地形を基準とし、堤長を300m(模型1.5m)、堤間隔すなわち開口部幅を100m(模型50cm)とした。2年経過後の地形変化を示すと、図—19のようである。単一の離岸堤の場合と同様背面は汀線が前進し tombolo が発達する。しかし開口部奥においては汀線が侵食され、波の集中のとくにはげしい No.15 ~19 間はその後退が著しい。この場合も全般的に地形変



図—19 離岸堤の効果

化が複雑となり、離岸堤沖は堤からの反射波によって不規則な地形を呈するようになる。とくに No. 13~15 沖 700~800m 付近に sand bar ができ、航路障害となる。それ以深では初期地形とほとんど変わらない。

6. 結 語

桂浜防波堤の延長にともなう航路埋没状況の変化および種崎海岸の侵食機構とその対策について種々の実験を実施したが、本実験のようなひずませた移動床模型実験においても、trial な検証過程を経ることによって現地地形変化の再現性は可能となる。また地形変化の傾向は波高分布とよい対応を示す。砂移動の傾向についても現地と模型とで蛍光砂を用いて対比した結果比較的良好一致を見た。しかし滞積土量についての再現性は必ずしもよくない。

航路維持の面では桂浜防波堤を延長するほど漂砂の廻り込みは少なくなり、効果がある。

しかし昭和43年11月時点における防波堤延長より110mおよび190m延長した場合については入港船舶の航路筋に滞砂が生じる。

種崎海岸の侵食は防波堤の延長にともなって減少するが、その位置が東方へ移る。この対策としての離岸堤の効果については、背面に tombolo が発生するが、開口部奥の汀線侵食が著しくなる。また離岸堤からの反射波により、その沖へ sand bar が発生し航路筋へ影響を与える。これらの原因および対策については間隔、設置位置についてさらに検討を進める。

またこのような防波堤の延長と航路内のしゅんせつにともなう埋没量の変化についても今後の現地観測および実験とで検討を進める考えであるが、実験と現地との相似性の検討上からも興味ある問題であろう。

付 記：この研究を進めるにあたり種々ご協力、ご援助を戴いた運輸省神戸調査設計事務所 高橋基次所長、および同高知港工事事務所 福田正昭所長に対し深甚の謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会編：水理公式集 昭和38年増補改訂版，昭和38，8，
- 2) Reinalda, R. : Scale Effect in Models with Littoral Sand-drift, Proc, 7th conf, on coastal Eng., 1961, Vol. 1, pp 318~325
- 3) 佐藤昭二・田中則男・入江功・平原淳次：港湾埋没に関する移動床模型の再現性 港湾技術研究所報告，第9巻，第1号，1970. 3, pp 71~123
- 4) 運輸省第三港湾建設局：高知港口の模型実験について，(第2報)，1962. 7