

埋立地前面における砂浜海浜の造成について

土屋 義人・藤木 繁男・関塚 良光*・中西 裕之**

ON THE FORMATION OF SANDY BEACHES IN FRONT OF RECLAMATION AREAS

By Yoshito TSUCHIYA, Shigeo FUGIKI, Yoshimitu SEKITSUKA and Hiroyuki NAKANISHI

Synopsis

In the reclamation area, sandy beaches are sometime constructed for marine leisure. It is difficult to construct such a sandy beach in front of the reclamation area because the water depth is generally considerably deep. In the case of construction of sandy beaches, offshore breakwaters have usually been used, but there exists no principle in the formation of stable sandy beach and no possibility of the formation. By applying the methodology for beach erosion control by headlands, it can expect to construct sandy beaches to be naturally formed between a couple of headlands. In this report, an example of the formation of stable sandy beach in the reclamation area is shown with a special reference to the Hannan-6-ku area in Osaka bay. Model experiment was carried out to examine the methodology and to determine the design conditions of stable sandy beach and headlands. It was concluded from the experiment that there exists a coupling system by headlands in the formation process of stable sandy beach. In the practical design, coastal disaster by wave over topping on the sea walls, that are constructed behind the sandy beach, was specially taken into consideration.

Based on the experimental results, by construction of a couple of headlands a sandy beach is now being formed in Hannan-6-ku reclamation area satisfactorily.

1. 緒 言

わが国は著しい経済成長を遂げ、次世紀に向かって都市時代を迎えようとしている。狭長な国土をもつわが国では、そのために沿岸域の開発利用が優先される一方、われわれの社会生活を楽しむ傾向が強くなり、それを海浜または海洋レクリエーションに求めるようになるであろう。このため、わが国の各地で海浜の造成が行われてきており、かなりの経験を積んできた。1979年には、運輸省港湾局が人工海浜の建設技術マニュアルを提案し、海浜造成の進展を図ってきたが、ようやく1987年3月に海岸保全施設築造基準が改定され、人工海浜の基準が新しく設けられた。その設計に当たっては、背後の堤防、護岸と一体となった防災機能、海浜の安定性、海浜の利用等を考慮して、基本断面、養浜材料流出の防止施設の種類等を決定するように定められている。また、設計条件は潮位、波、海底および海浜地形、流れおよび漂砂、海浜の利用などを考慮することになっている。断面形状はその防災上の機能、波浪条件および底質特性、海浜の利用状況などを考慮

* 大阪府企業局港湾課長

** (株)三井共同建設コンサルタント

して決定し、初期汀線形状は養浜材料流出の防止施設の配置、波などの外力により定まる造成後の汀線に近い形状にしておくものとされている。さらに、養浜材料は海浜の安定性、周囲環境におよぼす影響、供給可能量などを考慮して決めることにしている。また、海浜造成に関して、海岸侵食制御と関連して各種の研究が実施されてきた。これらがいずれも、海浜を安定化させることを基本としており、できるだけ安定な海浜を造成しなければならないことに依存している。しかし、この方面の最近の傾向をみると、いたずらに技術を過信するのか、かなり大きな構造物を作って、むしろその自然からの反作用を助長しているものが少なくない。このためには、より安定な性格をもつ砂浜海浜をどうして造成するかということに主眼をおくべくであり、こうすることによって必然的に海浜の防災機能の向上も図られることになる。

本報告では、埋立地前面における砂浜の造成法を確立することを目的とし、その具体的な事例として、大阪湾沿岸の阪南6区（はんなん6く）の海浜造成を対象とし、主として水理模型実験によって、安定性の高い砂浜をどうして造成するかについて、その可能性と具体的な方法を検討する。そのために、まず、本海浜造成の基本計画を述べたあと、安定な砂浜海浜の造成を海岸侵食制御の方法論との関係で検討し、そこで主眼とすべき基本的原則や安定海浜の存在とその形成について述べる。ついで、安定海浜に関するこの考え方で、海浜造成の基本計画に沿って、水理模型実験を実施して、安定性のある砂浜海浜が果たして造成できるかどうか、その可能性を検討して、その具体的な平面形状などを明らかにする。

2. 海浜造成の基本とその方法論

近年、海洋性レクリエーションが普及するとともに、その多様化がみられ、沿岸域の重要性が増大している。特に、都市近郊においてはその傾向が強く、人工海浜、ヨットハーバー、魚釣り公園等各種施設の整備が望まれている。一方、埋立地の造成により、既存の海浜が失われることとなるが、海浜には人びとが海と戯れることができる親水機能、波浪に対する海浜護岸背後への防災機能及び波による曝気効果や海浜の底生生物、微生物による水質浄化機能などがあり、その回復を図る必要がある。このような状況下において、大阪府企業局では、二色の浜地区のレクリエーション機能の拡充を目的に、Fig. 1 に示す大阪湾沿岸の阪南6区（はんなん6く）の埋立護岸（E 護岸）前面に海浜造成を計画している。

そこで、本報告では、このようなかなり大水深の海域における埋立地の前面に砂浜を造成する方法を見出すために、まず当初の計画である離岸堤、潜堤による造成の問題点を水理実験で指摘した後、将来の海浜利用を特に重要視してヘッドランドによる安定海浜の造成法を提案し、その適用性を水理実験で検討する。

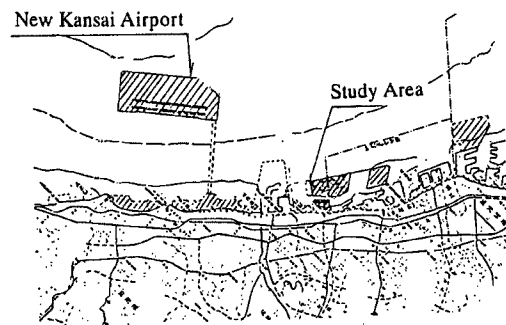


Fig. 1. Location of study area, Hanna-6-ku in Osaka bay and predominant wave directions.

2.1 海浜造成の基本計画

1) 安定な砂浜海浜の造成方法

当初計画では、Fig. 2(a) に示すように、離岸堤、潜堤とを組み合わせにより海浜勾配 1/40 で養浜して海浜造成するものである。これによれば比較的よい波浪減衰の機能を有するものと思われるが、台風時などの潮位の高いときに、比較的長周期の波浪に対する防波機能はあまり期待できず、かつ、開口部から沖に一度流出した漂砂は、再び岸側には戻ってこないと言う欠点があると考えられることから、長期的に安定海浜が形成されるかどうかについては多少疑問視される。

そこで、Fig. 2(b) に示すようなヘッドランドによる安定海浜の造成法をとりあげ、突堤を両側に設けて海浜勾配 1/5 かつ 1/10 の 1 つの砂浜として養浜することにする。すなわち、一対のヘッドランドを沖合にできるだけ出してそれらを境界条件として形成される安定海浜を造成する。このため海浜材料も海浜断面の安定をできるだけ確保できるように粒径の大きい材料を使って、海底まで緩勾配のよう勾配の海浜を作ると言う海浜造船について検討する。なお、実験では、前者の海浜造成法の問題点を調べるとともに、後者による安定海浜の形成とその安定性について検討し、長期的に安定な海浜が造成できるかどうかを背後地の防災をも考慮して検討する。

2) 水理実験の目的

埋立地前面がかなり大水深である阪南 6 区において、前述した 2 つの方法によって造成される砂浜海浜が果たして安定性を確保できるかどうか、また越波に対する防災機能について、一連の水理実験（平面実験と二次元実験）により検討する。

(1) 砂浜海浜の安定性：海浜地形の変化は、一般に入射波および底質の特性や初期地形によって左右される。そこで、平面実験では初期地形と波浪特性とくに構造物の設置に伴う波高変化による海浜地形の変化を検討し、二次元実験では、底質及び初期地形の特性による海浜断面の変化を検討する。

(2) 維持管理などの経済性：二次元実験により、潜堤の有無、2 種類の底質について海浜断面の変化を検討し、平面実験の結果を考慮して海浜断面の造成方法と将来の海浜の維持管理について検討する。

(3) 海浜護岸の安全性：平面及び二次元実験によって、背後地における許容越波流量 $q_w = 0.05 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ が満足できる海浜護岸断面となるように海浜造成を検討する。実験では、海浜断面がほぼ定常に達した状態で潮位を H.H.W.L まで上昇させて、そのときの越波流量を測定するとともに、2 時間波を作用させた場合の海浜断面変化に伴う越波流量の変化についても検討する。

2.2 安定海浜の造成論

ここでは、海岸侵食制御の立場から、大水深の埋立地前面における砂浜の造成について考察する。海岸侵食をどうして制御するかについては、われわれは多くの経験をもち、また具体的な工法の開発を行ってきた。海岸侵食を制御して、海岸保全を図るためには、十分長期的な観点に立って、かつ、Brunn¹⁾ が主張しているように、対象領域を十分広域に考えて、できるだけ安定な海浜を形成させるための方法論を究明しなければならないであろう。短期的な思考では、たとえある期間その方法が成功したとしても、異常波浪の来襲時にはかえって自然の反作用を助長することになり、とても安定な海浜を形成させるという立場での侵食制御は不可能となる。ここでは、海岸侵食制御における基本的な考え方とそれに基づく方法論について著者の一人、土屋²⁾ がこれまで主張してきた考えを要約しつつ、その立場から安定海浜の造成方法について述べる。

1) 基本的な考え方

海岸侵食に対する工法は、従来より多くの場合、きわめて試行的に行われてきた。これは、見方によっては、海浜の動態を見極めながら実施するという姿勢で、自然の動態を知り、その反応を確かめることにもな

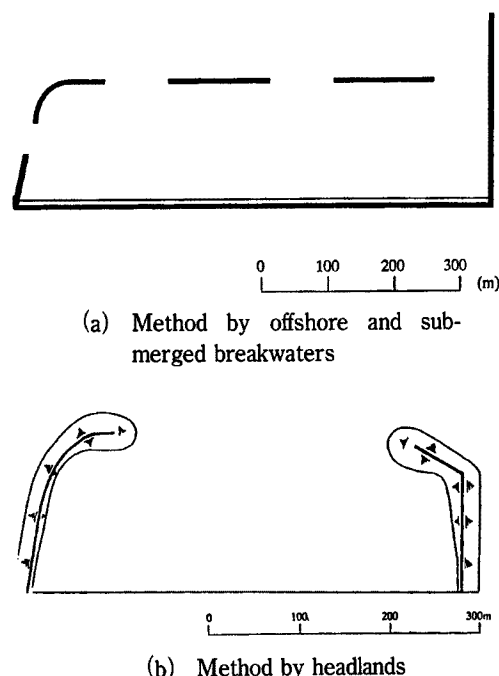


Fig. 2. Methods of construction of sandy beaches in front of reclamation area in Hanna-6-ku.

る。Brunn¹⁾ は次のように述べている。

Nature's engineering does not always satisfy man's ambitions. Man, however, learned from nature. Combining nature and man's efforts practical solutions have been obtained.

また, Silvester³⁾ は, 海岸侵食の方法論として,

How to copy nature.

を挙げている。これらの見解は, いずれも思想的には, オランダの耐水工法の考え方と共通している。海岸侵食から国土を守るにあたっては, 基本的にこの思想を心に留めるべきであり, いたずらに技術を過信しない方がよいと思う。すなわち, 具体的には, 自然の法則を学び知り, その方法に忠実な工法を開発し, 実際に適用していくべきであろう。

2) 漂砂循環システムと漂砂の連続性

自然海浜には, 漂砂の循環システムが形成されており, それは次の2つに分けて考えられるであろう。第1は, 古く沿岸砂州の挙動から海浜断面の季節変化として考えられてきたものである。すなわち, 冬期には侵食されて沿岸砂州が形成され, 夏期にはそれが破壊され, ときには浜にのりあげて堆積傾向を示す。この過程において, 沿岸砂州は自然の潜堤の役目を果たし, この漂砂の循環システムの基本をなしている。いうまでもなく, この漂砂の循環は季節変化に加えて, 数年程度の変化として現われるものである。一方, Wright および Short⁴⁾ によれば, 砂浜海浜はその断面形状によって, dissipative beach, intermediate beach および reflective beach に分類されるが, それは波および底質特性に依存し, それぞれ固有の海浜過程をとることになる。

次に, 第2は Inman⁵⁾ によるもので, 三次元的漂砂の循環システムであり, 海岸は数多くの基本的に閉ざされた海岸領域から構成されているといわれる。これはそれぞれの漂砂循環システムからなる漂砂系を表し, 前述した二次元的漂砂に循環システムをサブシステムとする漂砂系を考えれば, その系の中で漂砂源から供給された漂砂が循環し, 適当にバランスしていることになる。これらの漂砂の循環システムにおける基本原理は, いうまでもなく漂砂の連続性であり, それによって自然の循環系を形成しているのである。

このような漂砂の循環系に基づけば, 砂浜海岸は土屋および芝野⁶⁾ によって次の3つに分類される。すなわち, その系の中において漂砂の収支が平衡している閉漂砂海岸, その系から漂砂の流入出があり, 非平衡状態にある開漂砂海岸, およびその中間の状態にある擬閉漂砂海岸である。閉漂砂海岸の好例は, いうまでもなくポケットビーチあり, また開漂砂海岸のそれは河口デルタを含む海岸である。ポケットビーチがなぜここでいう閉漂砂海岸となり, その系の中で侵食も堆積も起こらない安定な砂浜を形成できるのかについては, Silvester³⁾ や土屋および芝野⁶⁾ が, また最近田中⁷⁾ が説明しているように, 砂浜の変形における境界条件として, 漂砂の上手および下手側に, その変形を規制するもの, たとえば岬(ヘッドランド)かあるいは突堤などが存在すると, 主波浪の入射方向が一定であれば, その区間の砂浜はしだいに一定の平面形状をもつ安定な砂浜を形成するように変形する。この場合, 当然終局的に安定した砂浜では, それに対応した海底地形を形成して波浪は屈折し, また岬付近では回折して波峰線は汀線に平行となり, 沿岸漂砂の存在しない浜となる。

この事実は, 最近, 土屋および Refaat⁸⁾, 土屋⁹⁾ および土屋, 陳および和田¹⁰⁾ によって理論的にその存在が示され, 安定海浜の理論形状が求められている。その理論形状を天の橋立海岸において突堤間に形成されているほとんど動的に安定と思われる砂浜 (Fig. 3 参照) の形状と比較している。これによると, 沿岸漂砂の上手側および下手側にそれぞれ一つの高浜変形の境界条件が与えられると, 沿岸漂砂量が一定(沿岸漂砂量が存在しない場合も含まれ, 静的に安定な砂浜といわれる) となるいわゆる安定海浜が形成されることになる。また, 一方実験的には, 土屋, 河田, 山下, 川崎および羽原¹¹⁾ によって, 沿岸漂砂の上手側および下手側にあるたとえばヘッドランドにより形成されるそれぞれの砂浜がそれらの中間部において, 協同し融合するときに限って安定海浜が形成されることが示されている。これらの事実が砂浜の造成において, 安定な海浜が形成できるための理論的根拠を与えるものといえる。ただし, 具体的には, 海浜変形の境界条件

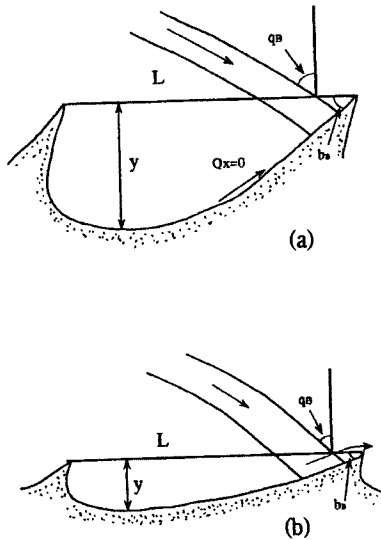


Fig. 3. Two kinds of stable sandy beaches; (a) Static stable beach and (b) Dynamic stable beach

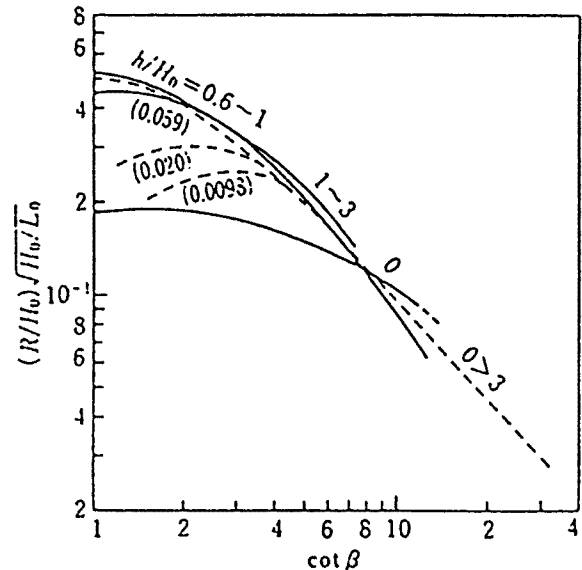


Fig. 4. Wave energy dissipation performance of sandy beach in relation to wave runup.

として機能できるヘッドランドとしての構造物をどうして作るかということになる。そこにもこのような問題の解決に水理実験で検討しなければならない理由がある。

自然海岸は、このように一般に長期プロセスにおいて、適当にバランスした漂砂の循環システムを形成している。河川流域の開発や沿岸域の利用のみならず、海岸保全施設などの築造によって、この循環システムはしだいに變形され、なかには完全に破壊されているものも少なくない。この循環システムは極端に破壊されない限り、自然はかなり追従し、これを是正しようとするであろう。完全に破壊された場合には、その将来を予測するために必要な自然の法則さえ、われわれは持ち得ないことになる。すなわち、海岸保全のためには、根本的に、この漂砂の自然の循環システムを確保する努力が必要であるといいたい。

3) 消波則と漂砂量則

海岸侵食の制御において必要とされる法則性として、波浪、海浜流、漂砂、海浜變形などを解明してそれらの法則性を見いださなければならない。これらのうち、海岸侵食制御および安定海浜の造成において必須な事項は何かといえば、漂砂の連続性の確保であり、そのためにはできるだけ消波機能の高い浜を形成させて反射波を減少し、沖方向漂砂を発生しないようにし、かつ沿岸漂砂の一様性を確保することであろう。すなわち、その法則として、海浜の消波則と沿岸漂砂量則を取り上げたい。このうち海浜の消波則の表示としては、反射率または波の遡上高さでもよい。いま、Saville⁹⁾の実験結果を用いて、勾配 1/20 の傾斜海浜上にある勾配 $\tan \beta$ の傾斜への波の遡上高さ R と沖波波高 H_0 との比 R/H_0 に対して、実用的に波形勾配 H_0/L_0 の 1/2 乗を乗じて、傾斜勾配との関係で表すと、Fig. 4 のようになる。ただし、洗水水深 h と沖波波高 H_0 との比 h/H_0 をパラメータとし、また、 $h/H_0 > 3$ の場合で、斜面勾配が大きい場合には波形勾配の影響がさらに加わるようである。ここで、特記すべきことは、斜面勾配が 1/3 程度までは遡上高さがきわめて大きく、1/10 程度になると、急激に減少する。また、反射率においては、勾配 1/10 以下であれば、波の周期にほとんど関係せず数パーセントであり、いかなる消波工より消波効果が高い。すなわち、一般の自然海浜の消波特性はきわめて高く、反射波の発生がほとんどないので、沖方向漂砂を発生させない最も有効な浜は自然の砂浜であるといえてよい。

次に、沿岸漂砂の一様性を確保するためには、沿岸漂砂則を知らなければならない。種々のものが提案さ

れているが、基本的には次のように表されるとしてよいであろう。

$$Q_x = ch_B \sqrt{gh_B} \sin 2\alpha_B \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 h_B : 碎波水深、 α_B : 碎波角、 g : 重力の加速度、および c : 定数である。通常、沿岸漂砂量は波のエネルギーフラックスの沿岸方向成分に比例するとされているが、式(1)はこのことと同値である。最近、沿岸方向に波高が存在する場合、沿岸漂砂量則の中にあらわに波高の沿岸方向変化を導入する試みも行われているが、大局的にはこの表示で十分であろう。

このような表示からわかるように、沿岸漂砂量は碎波水深の3/2乗に、また碎波角にほぼ比例する。したがって、碎波水深を人為的に変えれば、沿岸漂砂量の沿岸方向分布が急変するので、侵食や堆積が起こることになるし、また碎波角は一般にかなり小さく、それにほぼ比例して沿岸漂砂量が変化するので、汀線の線形を変えて碎波角が変わるようなことをすると、Brunn¹⁾ がいっているように、沿岸漂砂量は敏感に変わり、侵食や堆積が起こることになる。前述した漂砂の連続性からいえば、海岸侵食制御の基本原理の1つは、オランダの耐水工法の思想のように流線の原理であり、むやみに沿岸漂砂の不連続点や折点を作らないようにすることであるといえる。

海岸侵食を制御して安定な海浜を造成する方法としては種々のものが考えられる。また、埋立地の全面に砂浜を造成するような場合には、前述した沿岸漂砂は一般には存在させないように、いかに静的に安定な砂浜を造成するかということになる。しかし、その場合に、最も強調すべきことは、漂砂をはじめとする海浜過程における自然の原理に基づいて、あまり自然から強い反作用を受けないような工法を追及すべきであり、反作用を増幅させ、または継続させるような方法は厳に慎むべきであろう。

3. 安定な砂浜海浜の造成に関する実験

前述した安定海浜の形成に関する考察に基づいて、この対象地点に果たして、2つの方法により安定な砂浜が形成できるかどうかについて水理模型実験を行ったので、その結果を述べる。まず、適用した相似則について簡単に述べたあと、実験方法および実験結果について説明し、これら2つの造成法を比較検討することにする。

3.1 相似則

水理実験によって海浜過程を明らかにしようとする場合には、言うまでもなく、適切な相似則に基づいて実施しなければ得られた結果は必ずしも現地に適用できるものではない。しかし、海浜変形の相似則は種々提案されているが、実際用いられるものとしては1) わが国では伊藤、土屋のものぐらゐであり、2) 諸外国では Dean のものが適用されている。ここでは、波の条件に対しては、Froude の相似則を適用することとし、安定海浜の形成過程を考える波の屈折特性を歪ませるわけにはいかないので、平面実験では鉛直、水平縮尺1/40の無歪の模型とし、また二次元実験でも無歪として鉛直、水平縮尺1/25とした。そして、海浜変形が主体であることから、伊藤、土屋¹²⁾ の海浜変形の相似則によって底質特性を決定することにした。すなわち、その相似則はFig. 5に示しているように Froude の相似則で波の特性を決定した場合、その縮尺に対して実験で用いるべき底質粒径の現地のそれに対する比が決定できるようになっている。計画中の海浜造成の底質粒径が $D_{50} = 0.1 \text{ cm}$ および 0.5 cm 程度の2種類であることから、平面実験では、海浜地形の変動が大きいと予想されるので、実験において用いるべき底質として粒径 $D_{50} = 0.025 \text{ cm}$ および比重 $\sigma/\rho = 2.65$ の珪砂を用いることとし、海浜断面の変化を調べるための二次元実験では、 $D_{50} = 0.1 \text{ cm}$ の原型に対する底質として標準砂(粒径 0.027 cm および比重 2.65)、 $D_{50} = 0.4 \text{ cm} \sim 0.6 \text{ cm}$ の原型に対する底質はろ過砂(粒径 0.1 cm 、比重 2.65)を用いることにした。

次に、適用した海浜変形の相似則においては、波特性について Froude の相似則を適用し、漂砂現象における縮尺効果は実質的に底質特性にのみ歪みを与えたことに対応するので、その時間に対する相似則は必ず

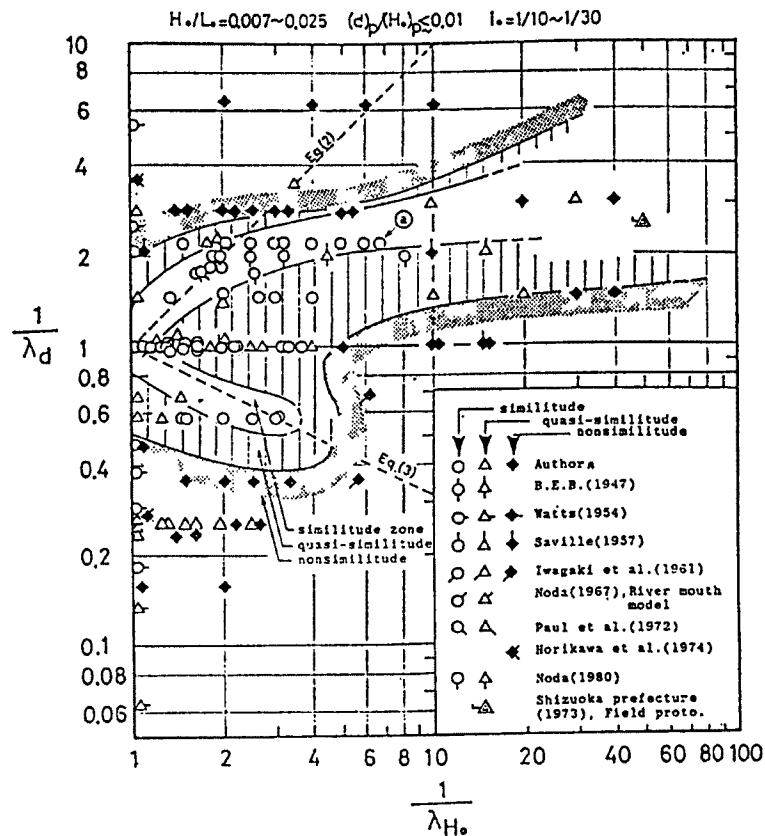


Fig. 5. Similitude of beach profile change by Ito and Tsuchiya (1986).

しも明確ではなかったが、最近の伊藤および土屋¹²⁾の研究によれば、時間縮尺は Froude の相似則に従うので、ここでは、冬期波浪の時間としては 2 年間程度でできる海浜変形を想定した波の継続時間として 30 時間、暴風時の波浪の時間としては 1 日～2 日程度の暴風時の継続時間を想定した波として 2 時間を設定した。なお、海浜変形の過程を把握するために 3 時間毎の汀線測定を 15 時間毎の海浜地形の測定を行った。

3.2 実験波

泉南沖に設置された運輸省海上観測施設 (MT 局) の近年の波浪観測資料から冬期風波の諸元を、また台風時の波浪 (計画設計波) は、伊勢湾台風級の台風が室戸台風コースを通過した場合について、波浪推算した結果から設定した。なお、潮位については、冬期風波時が海浜変形にとってより危険側の条件となるので、 $H.W.L = D.L + 1.85 \text{ m}$ とし、台風時に対しては $H.H.W.L = D.L + 4.25 \text{ m}$ とする。その結果、これらの潮位に対して、冬期季節風波では有義波高 $H_{1/3} = 2.00 \text{ m}$ 、周期 $T_{1/3} = 6.5 \text{ sec}$ で波向は W とし、台風波浪では $H_{1/3} = 3.00 \text{ m}$ および $T_{1/3} = 13 \text{ sec}$ で SW の波浪を対象とした。これらに対する実験波は Froude の相似則によって、平面実験および二次元実験のそれぞれに対して縮尺 $1/40$ および $1/25$ によって定められた。

3.3 実験水槽および潮定装置

本実験は、京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所内に設置されている扇形波浪平面水槽を用いて行った。この水槽の概要は直径 35 m の半円形部と $3.5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ の長方形部からなっている。この半円形部に

は、水槽外壁上を自由に移動できる規制波発生用造波機が設置されており、任意の波向を持つ規則波を発生させることができる延長 12 m の造波板が 4 m ごとに 3 分割されており、波の位相を変えて発生させることも可能である。この水槽の長方形部には阪南 6 区の海底地形および周辺の地図を基にした水平および鉛直縮尺 1/40 の無歪の模型海浜を設けた。移動床の厚さは、底質の移動量を考慮して、汀線付近を比較的厚く 15 cm 程度とし、その他は 10 cm 程度にした。既計画案に対する模型海浜には、離岸堤や潜堤を設置したが、それらはいずれも現地への適用性を考慮して、コンクリートブロックの堤体でその周辺を玉石で被った不透過構造とした。なお、移動床として用いた実験砂は、前述した豊浦標準砂である。安定海浜の模型海浜には、両端にヘッドランドを設置し、現地への適用性を考慮して、それらは玉石と砂利による不透過構造とした。

海浜断面の測定は超音波式砂面測定器を用いたが、極浅水部では 1 cm 間隔に目盛りを刻んだ真鍮棒のスケールを併用して測定した。また、超音波式砂面測定器の移動は架台上台車をマイクロコンピュータによって制御し、正確に測点である格子点上を移動させた。汀線変化の測定はあらかじめ設置した基準点からの汀線変化として測定した。さらに、波高分布の測定には容量式波高計を用いて、測定格子点毎に測定した。海浜流の流速および流況測定には赤、黄色の二種類の小さなゴムマリを多数水面に浮遊させ、その移動を連続写真により測定した。

なお、越波流量の測定は 24.5 × 15.0 cm のバットを用いて越波水を採取し、その容量を計測した。

3.4 実験ケースおよび実験方法

本実験は、当初計画の離岸堤、潜堤による方法と安定海浜工法による 2 つの方法で果たして安定な砂浜が形成できるかどうかを実験的に検討するわけであるので、そのことが結論できるように実験ケースを次のように定めた。本実験で実施した実験は Table. 1 に示すように 5 ケースであるが、それらの実験目的は次のようである。ただし、この表には対象とした潮位、波の特性のほか実験の継続時間も示してある。

(1) Run 1：当初計画である離岸堤、潜堤による方法で果たして養浜砂が流失せず、長期的に安定な砂浜が形成されるかどうかを調べる。

(2) Run 2：Run 1 の実験によって、南側離岸堤の開口部潜堤から養浜砂が流失することがわかったの

Table 1. Outline of experimental conditions of formation of sandy beach in front of reclamation area

Run	Tide Condition	Wave Direction	Wave Height H_m in cm	Wave Period T_m in sec	Total Duration in hr
1	H.W.L.	W.	5.0	1.0	46
1a	H.H.W.L.	SW	7.5	1.0	46 to 48
2	H.W.L.	W	5.0	1.0	30
3	H.W.L.	W	5.0	1.0	36
4	H.W.L.	W	5.0	1.0	30
5	H.W.L.	W	5.0	1.0	30
5a	H.H.W.L.	SW	7.5	1.0	30 to 32
5r	H.W.L.	W	5.0	1.0	21
5rr	H.W.L.	W	5.0	1.0	21 to 36
5rrr	H.W.L.	W	5.0	1.0	36 to 46

で、それを閉鎖した場合の砂浜の形成および海浜勾配の変更による砂浜の形成と養浜砂の流失防止効果を調べる。

(3) Run 3：安定海浜工法による場合、ヘッドランドの延長と間隔（海浜開口幅に相当する）によって安定海浜の形成がどう変わるかを調べる。

(4) Run 4：ヘッドランドの頭部を一部撤去し、また初期海浜地形を変更したとき、それらが安定海浜の形成にどのような影響を与えるかを調べる。

(5) Run 5：さらに、ヘッドランド長を変えて、最も理想的な安定海浜が形成される条件を見出す。

これらの実験においては、1) 離岸堤、潜堤およびヘッドランドの配置やそれに伴う海浜変形、砂浜の形成過程における波の変形とくにその空間分布を調べるために、波高分布をできるだけ詳細に測定し、2) さらに養浜砂の流失状況またはその機構を明らかにするために、海浜流の空間分布を測定し、3) 養浜によって果たしてどのような海浜変形の過程を経て安定海浜が形成されるかを知るために、海浜地形の詳細な計測を実施し、同時に海浜変形に伴う汀線変化を計測することとした。さらに、最も適用性の高い砂浜造成のケースについて、最後に背後地の越波に対する防災のため、潮位 H.H.W.L. において前浜幅および護岸形状による越波量の変化を調べ、許容越波量を満たすような砂浜および護岸条件を見出すことにした。

3.5 実験結果とその考察

1) 砂浜の形成と養浜砂の流出

冬期風波を対象とし、離岸堤、潜堤を用いて海浜造成をした場合の汀線変化を Fig. 6(a) および (b) に示す。冬期風波の波向は図中に矢印で示したように離岸堤法線に対して斜めに入射することから、波の侵入方向に対して下手側にずれた舌状砂洲を形成する。もちろん養浜砂をさらに増せば、下手側に傾いたトンボ口が形成されるであろう。特に、(a) では左側（現地では南側）突堤に開口部があることから、ここからの養浜砂が流出してこの付近の汀線は後退するので、形成される砂浜は安定化する傾向は示さない。そこで、(b) に示したように、その開口部を閉鎖した場合について同様な実験を行い汀線変化を調べたが、図から分かるように汀線は前進傾向を示す。また、30時間後の海浜地形を用いて、このときの地形変化を侵食・堆積図として示すと、Fig. 7(a) および (b) のようになる。このうち (a) は開口部のある場合であり、また (b) はそれを閉鎖した場合のものであってそれぞれ Fig. 6(a) および (b) に対応するが、これらから明らかなように、いずれの場合にも、すべての離岸堤開口部からの養浜砂の流出することが確認される。この傾向は養浜砂量を増加させればさせるほど顕著になるであろう。

つぎに、ヘッドランドによる安定海浜工法で海浜造成を行った場合の汀線変化を Fig. 8(a) および (b) に示す。これによってヘッドランドの配置および規模と養浜砂量などとの関係で汀線変化から安定海浜の形成について検討しよう。まず、(a) に示すように養浜砂が2つのヘッドランドによって砂浜が形成されるのに十分でない場合には、汀線変化の傾向は明らかでなく、安定な海浜形状を示さず、浜中央部で一部突出したところが発生している。この原因は冬期風波の波向がほぼ W 方向であり、右側の防波堤とヘッドランド

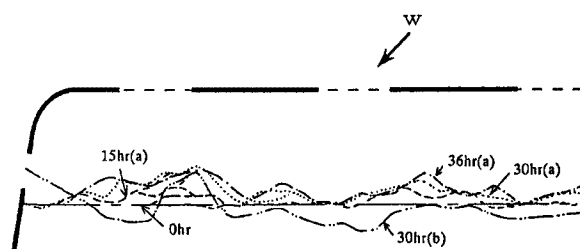
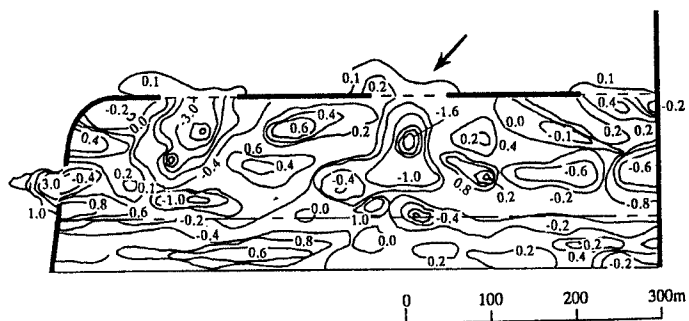
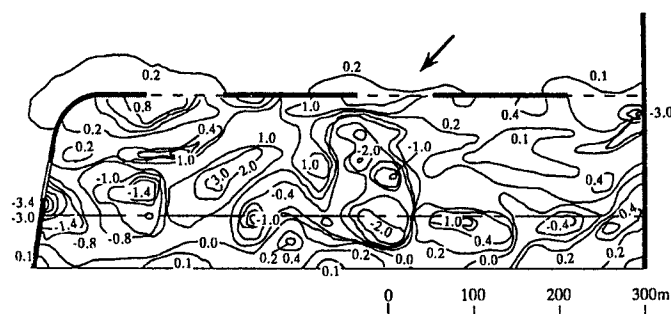


Fig. 6. Changes in shoreline in formation of sandy beach by offshore and submerged breakwaters.



(a) In the case where an opening is constructed in the south side of beach.



(b) In the case where no opening is constructed in the south side of beach.

Fig. 7. Spatial distributions of eroded and deposited areas in formation of sandy beach by offshore and submerged breakwaters.

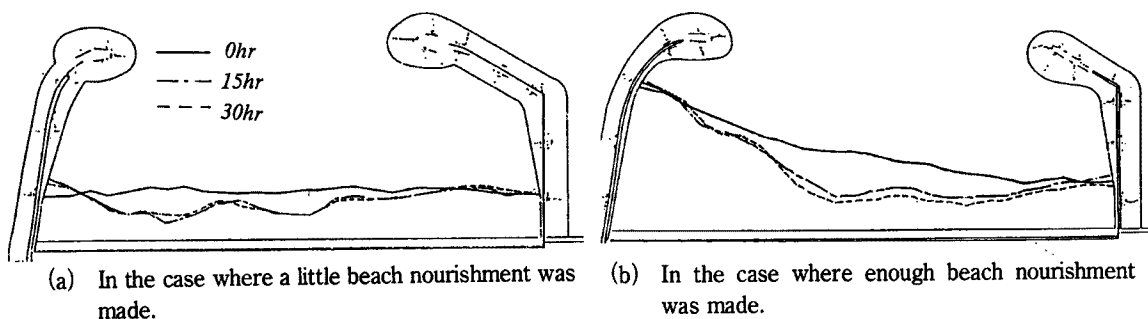


Fig. 8. Changes in shoreline in formation of sandy beach by headlands.

により両方から発生する回折波によるが、それらがほとんどまっすぐ入射して、あまり漂砂を発生しないためと思われる。したがって、右側ヘッドランドの頭部を撤去して、かつ養浜砂量を増加させて、またヘッドランドの頭部を少し撤去したり、また配置を変えたりして、そこに形成される砂浜の汀線変化を調べたこととしたが、その結果を (b) に示す。ただ、これらの実験では、安定な海浜地形が短時間で形成できるように、最初からある程度、その海浜地形に近い形で人為的に造成してから、波を長時間作用させて実験することにした。そうすると、図からわかるようになんかなり安定海浜に近い汀線形状を示すようになることがわか

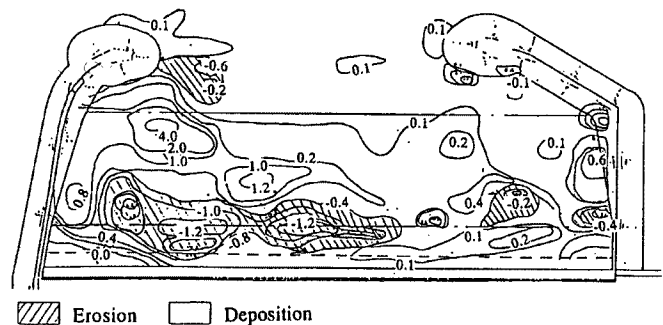
る。そして、そこには一つの安定な砂浜が形成される何か条件が存在するように思われる。

また、養浜砂量の相違による海浜地形の変化を30時間後の海浜地形 Fig. 9(a) および (b) に示すが、これによって砂浜の変形状況が良く理解できるので、さらにこれを用いて侵食・堆積図を作り Fig. 10(a) および (b) に示す。いうまでもなく、これは初期海浜地形に依存するが、これらの結果からわかるように、砂浜海浜は安定に近づいてきているはずである。ただし、ヘッドランドによる回折波領域では波高がかなり減少するので、漂砂が見られなくなってほとんど海浜地形の変化が起こらなくなったが、これは縮尺との関係で本実験の限界であると理解すべきである。

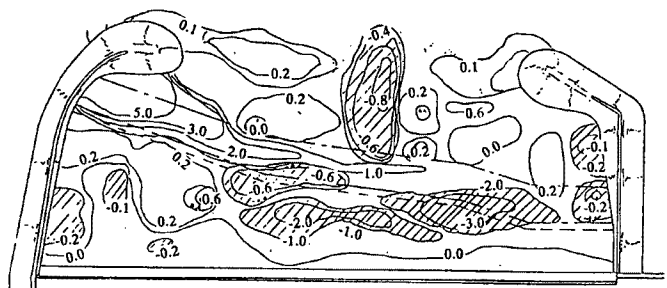
2) 波高分布と海浜流の流況

これら2つの場合における波高分布とそれに伴う海浜流の流況について、つぎに考察する。まず、Fig. 11(a) に示すように離岸堤による場合には、波高変化は開口部における局所洗掘の時間的変化に対応して波高分布も変化しており、左側開口部からの養浜砂の流出を増加させる傾向になっている。このことからすれば、養浜砂の流出防止のため、左側開口部を閉塞する必要がある。(b) では、右側ヘッドランドからの回折波が発生しており、それが漂砂に大きく影響する場合には、左側のヘッドランドの頭部付近からの養浜砂の流出が生じるものと予想された。それ故、(c) に示したように、ヘッドランドの頭部を撤去して、再度実験すると、波高分布も平面的にはほぼ一樣になり、あまり集中することもなく、比較的汀線変化も安定することがわかった。その結果、海浜地形として、比較的安定性の高い海浜が造成できる結果となった。

つぎに、離岸堤、潜堤による場合の流況を冬期風波時について Fig. 12 に示

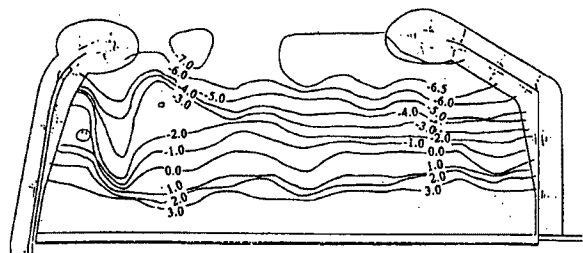


(a) In the case where a little beach nourishment was made.

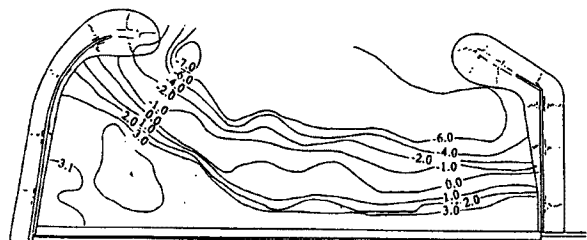


(b) In the case where enough beach nourishment was made.

Fig. 9. Sea bed topography when 30 hrs were passed in formation of sandy beach by headlands.

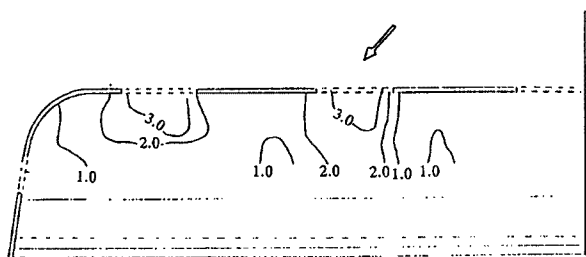


(a) In the case where a little beach nourishment was made.

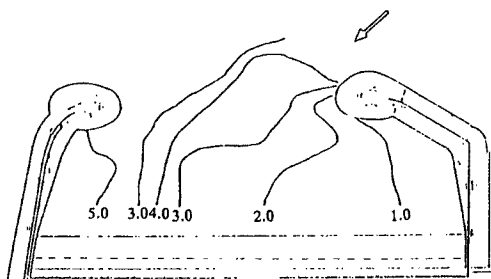


(b) In the case where enough beach nourishment was made.

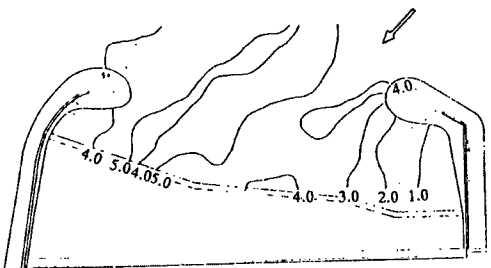
Fig. 10. Spatial distributions of eroded and deposited areas when 30 hrs were passed in formation of sandy beach by headlands.



(a) In the case of offshore and submerged breakwaters where an opening is constructed in the south side of beach.

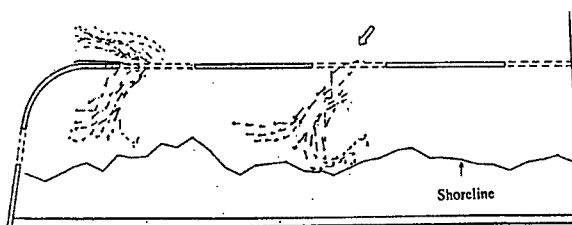


(b) In the case of headlands where a little beach nourishment was made.

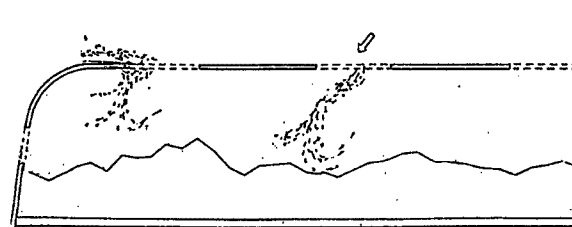


(c) In the case of headlands where enough beach nourishment was made and an offshore end part of headland was removed a little.

Fig. 11. Spatial distributions of wave height in formation of sandy beach by offshore and submerged breakwaters and headlands when experimental waves of 5.0 cm in wave height and 1.0 sec in wave period were employed.



(a) In the case of surface current velocity.



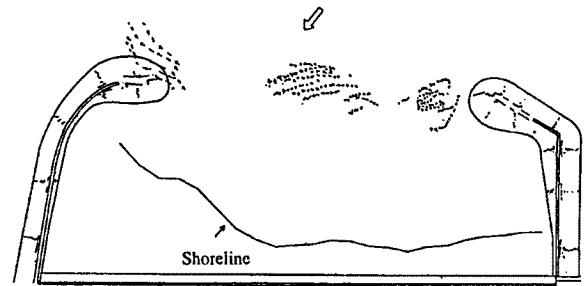
(b) In the case of bottom current velocity.

Fig. 12. Spatial distributions of current velocities in formation of sandy beach by offshore and submerged breakwaters.

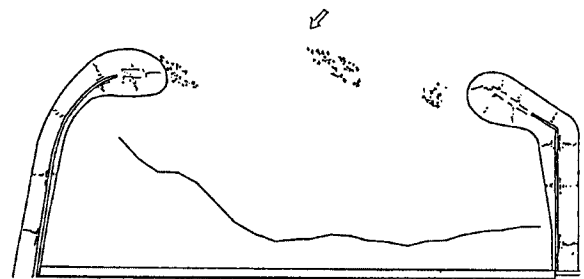
す。これによると、(a)に示した表層流は開口部から入射する波とそれによる回折波の影響を強く受け、そこに発生する波高分布に対応した海浜流の流況を示しているように思われる。特に、左側の開口部からの流出が表層流には大きく影響しているようである。また、(b)に示した底層流は表層流の約1/2程度の流速であるが、その流向は表層流のように波向とは一致せず、少し流向が偏っていることがわかる。特に注目すべきことは、開口部より波の質量輸送によって流入した海水が開口部において底層流となって沖側に流出することである。その流速はきわめて大きく、とくに底部に集中するので、それに伴って養浜砂が沖へ流出することになり、このことはすでに海浜地形の変化において考察した通りである。以上のことから、離岸堤、

潜堤よる場合では、開口部からの波の質量輸送に伴って流入した海水が、回折波の波高分布に従って流れ、それが再び開口部の底部から流出するため、開口部両端で局所的に洗掘が生じ、養浜砂がここから沖へ流出することになると判断される。異常潮位の場合には、離岸堤を越波して流入する海水も同時に開口部の底部から沖へ戻ることになるので、養浜砂の流出をさらに助長するであろう。

つぎに、ヘッドランドによる安定海浜工法の場合について、その流況をまず養浜砂の少ない場合について Fig. 13(a) に示す。これによれば、右側のヘッドランド付近で表層流の流れが存在し、また左側のヘッドランド付近では、流れが沖に向かっていて、これらはいずれも波の質量輸送によるものである。底層の流れもほとんど同じ傾向を示しており、左側のヘッドランド付近から沖へ流出することがわかる。ただ、流入した海水はヘッドランド間全体に渡って沖側へ戻ることになるので、その流速は離岸堤、潜堤の場合よりかなり小さい。それに対して (b) のヘッドランドによる場合の流況図では、ヘッドランド間の中央部での表層流が多少速い流れを示すが、その方向は一定せず、特に底層流ではこの傾向が著しく、沖方向への漂砂の流出は少ないことを表している。



(a) In the case of surface current velocity.



(b) In the case of bottom current velocity.

Fig. 13. Spatial distributions of current velocities in formation of sandy beach by headlands.

4. 海浜断面の変化と平衡断面形状に関する実験

前述したように、砂浜海浜を造成したあと養浜砂が流出するかどうか、どういう海浜断面で安定海浜を形成するかどうかについて実験的に調べることにした。

4.1 実験装置および実験方法

本実験は、京都大学防災研究所付属宇治川水理実験所内に設置されている2次元不規則波浪水槽を用いて行った。この水槽は幅0.70 m、深さ1.0 mおよび延長12.0 mの両面ガラス張りのもので、その端部に縮尺1/25の模型海浜を設置した。それは砂浜海浜の造成において計画の海底まで一様勾配で砂浜を造成した場合と天端水深が1.85 mになるような潜堤を設置してそこから一様勾配に砂浜を作った場合を対象とした。なお、実験砂としては、すでに相似則のところで述べたように、中央粒径0.027 cmの豊浦標準砂と中央粒径0.100 cmのろ過砂を用いた。

海浜断面の測定には超音波式砂面測定器を使用して、それをマイクロコンピュータで制御できる台車に乗せて移動させて計測した。また、汀線変化の測定はガラス面を通して直接測定するとともに、写真撮影で汀線変化のみならず海浜断面の変化を調べた。波高の測定は容量式波高計によって沖波のみならず、波高分布も計測した。

4.2 実験結果とその考察

実験は次のように合計9ケースについて実施したが、それぞれの目的および実験条件を示したあと、簡単にその主な結果だけを述べる。

(1) Run 1: 豊浦標準砂を用いて、潜堤を設置せず海浜初期勾配 1/10 で、規則波を作用させた場合の海浜断面の変化とその平衡断面形状を見出す。

(2) Run 2: 同じ条件で初期海浜勾配を 1/20 とした場合について、初期勾配の影響を見出す。

(3) Run 3: ろ過砂を用いて、潜堤を設置せず海浜初期勾配 1/20 で、規則波を作用させた場合の海浜断面の変化とその平衡断面形状を見出す。

(4) Run 4: 同じ条件で不規則波（ただし、有義波高を用いる）を作用させ、かつ潮位条件として L.W., H.H.W.L. そして再び H.W.L. に変化させた場合について、海浜断面の変化状況を見出す。

(5) Run 5: Run 3 と同じ条件で、Run 4 の不規則波の平均波高を用いて、潮位条件として L.W.L., H.H.W.L. そして再び H.W.L. に変化させた場合について、海浜断面の変化状況を見出す。

(6) Run 6: Run 3 と同じ条件で、潜堤を設置した場合について潮位条件として L.W.L., H.H.W.L. そして再び H.W.L. に変化させた場合について、海浜断面の変化状況を見出し、潜堤の効果を明らかにする。

(7) Run 7: Run 6 の条件で、ただし豊浦標準砂を用いて同様な実験をし、底質粒径の影響を見出す。

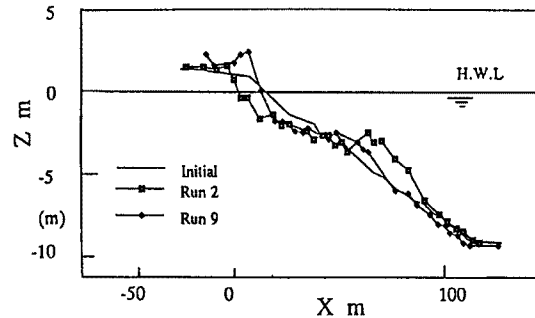
(8) Run 8: さらに、同じ条件で不規則波を用いて潮位条件として L.W.L., H.H.W.L. そして再び H.W.L. に変化させた場合について、海浜断面の変化状況を見出す。

(9) Run 9: 同じ条件で、潜堤を設置しない場合について実験し、潜堤の必要性を検討する。

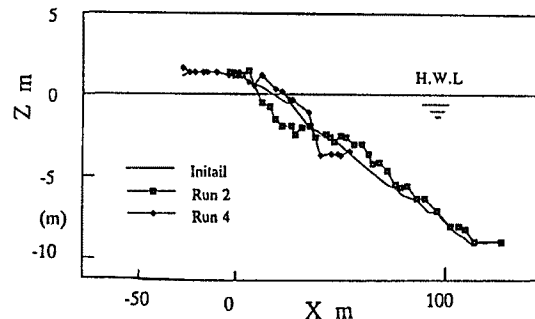
1) 初期海浜からの地形変化と底質の影響

実験結果の一例を Fig. 14(a) に示すが、これら一連の実験結果から、まず初期勾配の影響については、次のように考察される。初期海浜勾配が 1/10 の場合には、岸に近いところで碎波するために、局所的な海浜変形が生じて汀線は後退し、沖浜に堆砂して平衡海浜断面を形成しようとする。これに対して、勾配 1/20 の場合には、ほぼ同様な変形過程であるが、沿岸砂州を形成して比較的遠浅な海浜地形が形成される。

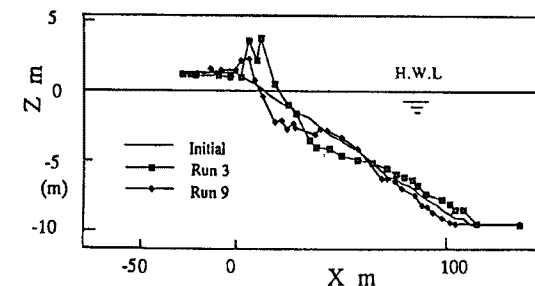
一方、豊浦標準砂およびろ過砂を用いた場合の海浜地形の変化については、その一例を Fig. 14(b) に示すように、前者では汀線近くで局所的な変形によってバームが発生するが、やがて沿岸砂州のある緩やかな海浜断面を形成する。後者では、碎波によって打ち上



(a) Comparison of beach profiles in regular and irregular waves where Toyoura standard sand was used.



(b) Comparison of beach profiles in two different sediment when regular waves were used.



(c) Comparison of beach profiles in two different sediment when irregular waves were used.

Fig. 14. Examples of beach profile change and its equilibrium profiles.

げられた漂砂が堆積してバームを形成する。後者では、碎波によって打ち上げられた漂砂が堆積してバームを形成しながら汀線は前進する傾向を示す。いずれの場合にも長時間のあとには平衡断面形状に近づき著しい変形は起こらなくなる。当然、前者の方が後者より地形変化の範囲が広く、それは底質の移動限界水深の相違に依存している。このことからすれば養浜砂の沖方向への流出を防止するためには、後者のほうがよく、海浜造成においては少し底質粒径を大きくしたほうが実際では有効であろう。

2) 規則波および不規則波による海浜断面の比較

その一例を Fig. 14(b) および (c) に示すが、これは Runs 2 および 9 の場合で規則波または不規則波を用いたほかはすべて同一条件で実験した結果である。もちろんこの種の実験で不規則波のどの特性と規則波のそれとを対応できるのかはいまだ不明であり、また継続時間を全く同一にできるという根拠もないが、両者の海浜断面は比較的良好に対応しているといえよう。それらの細部の形状は相違しているが、規則波によるほうが不規則波の場合より若干先行していると思われる。

5. 砂浜海浜の造成に関する考察

以上述べた砂浜の造成に関する水理模型実験によって、大水深の沿岸域に長期的に安定な砂浜を造成するには、養浜砂の流出を防止することのみ留意して、離岸堤などの構造物で囲むような工法ではかえって養浜砂の流出を招くことがわかった。これに対して、一対のヘッドランドを適当な配置のもとに設置すると、その間には安定な砂浜が形成させることができることを実験的に確かめることができた。ここでは、この実験結果に基づいて、具体的にどうすれば安定な砂浜を造成できるか改めて検討し、その背後地の越波に対する防災にも配慮して望ましい安定海浜の造成法について考察する。

5.1 安定海浜の形成とその平面形状

砂浜の形成に関する実験によれば、一対のヘッドランドを設置すると、そこには砂浜が形成されるが、そこにはある条件が存在するようである。すなわち、養浜砂量が少ないとヘッドランドによって変形された波でもそこには安定と思われるような砂浜は形成されず、ただ舌状の砂州が形成されるだけであるが、ヘッドランドの配置を変えるか、あるいは養浜砂量を適当にすると、比較的安定な砂浜が形成されるようである。しかし、養浜砂量をあまり多量にすると、当然沖側に流出してしまい、むしろ直線状の砂浜となり、かえって、その安定度が失われるように思われる。では、安定な砂浜が形成され、存在できる条件は何かということを考えなければならない。

そのことを一連の水理実験において模索したわけであるが、ここでもう一度再検討してみよう。前述したように、⁶沿岸漂砂量が一定であるような砂浜が確かに理論的に存在することが示されており、それは海浜変形の境界条件としてのヘッドランドが存在するときに限ることもわかっている。いいかえれば、一対のヘッドランドが設置されてもそれらが海浜変形の有効な境界条件として作用しない限り、そこには安定な砂浜は形成されないのである。さらに、いいかえれば漂砂の上手側および下手側のヘッドランドによってそれぞれ形成される独立の砂浜がそれらの中央部で交わり協同し、融合した場合に限り、一つの安定な砂浜として形成されるわけである。

事実、前述した実験においても、養浜砂量によっては2つのヘッドランドによってそれぞれ形成される砂浜が独立に作用しているかに見えたものがあつたので、ヘッドランドの頭部を変えたり、撤去したりしたのである。こうして最終的にそのような条件にほぼ到達できたのが Fig. 8 に示した最終結果である。それでも右側のヘッドランドの遮へい域では一部では波高が減少して十分な漂砂がしないので、曲線状の砂浜が形成されず、前述した2つの砂浜の協同融合の関係が必ずしも十分でないように思われる。

5.2 越波防止を考慮した砂浜の造成

Fig. 8 に示したように、一対のヘッドランドを適当な規模と配置で設置すると、そこには安全な砂浜が形成されることがわかったが、その砂浜の中央部の護岸からの距離は越波防止の観点から果たして十分であるかどうかを調べなければならない。そのために、前述した Runs 1 および 5 では許容越波量を超える場合もあったので、越波防止のためには砂浜の中央部の浜幅を増大させる必要があることがわかった。そのために、Fig. 15 (ただし、図中に点線で示した汀線形状は Fig. 8 に示したものであり、中央部のヘッドランドがない場合である) に示すように中央部に小さなヘッドランドを設置し、越波防止を図ることとし、また異常波浪時における砂浜の変動を少なくすることを考えることにした。しかし、砂浜の形成過程そのものにはあまり影響がないと思われたが、念のためこのような3つのヘッドランドの配置で Run 5 の実験に継続させて再度海浜変形の実験を実施した。このときの延べ46時間後における最終汀線形状を図中に実線で示す。それは点線で示した Fig. 8 の結果とさほど変化は見られなかったが、これら3つの境界条件によって2つの相互に協同し融合した砂浜が形成されることがわかった。その状況を写真撮影したものが Photo. 1 である。前述した海浜変形に平面実験 Runs 1 および 5 の場合について、それぞれ潮位条件として H.H.W.L. で台風時の SW からの波浪条件を与えて越波量を測定したが、ほとんど越波しないことがわかった。これらの検討から、Fig. 15 に示したような初期地形で養浜すれば2つの協同し、融合した砂浜が形成できると思われるので、これを現地に適用することになったのである。

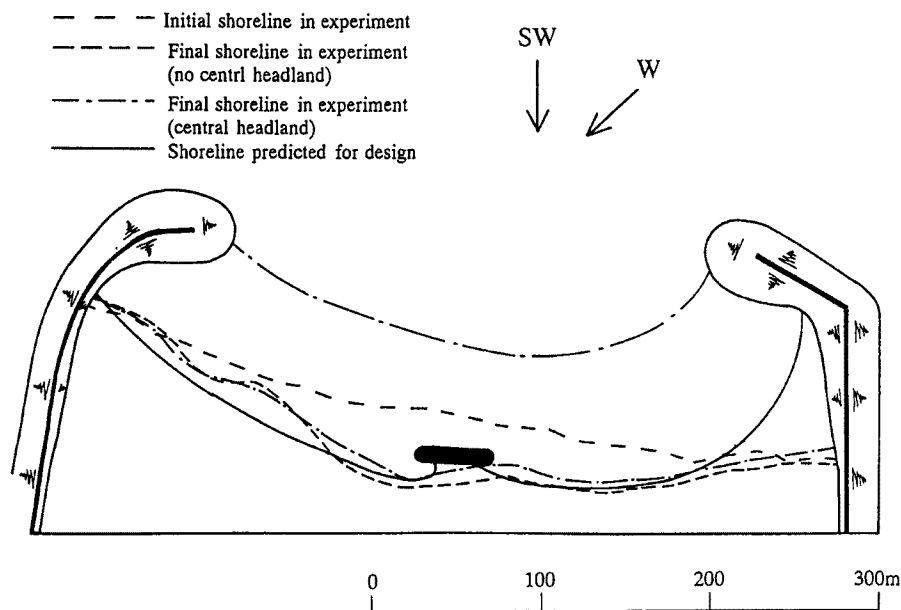


Fig. 15. Final shoreline configurations of stable sandy beaches formed by three headlands where solid line shows the final shoreline formed by three headlands and dotted ones indicate final shoreline by a couple of headlands, and thin line is the initial shoreline in beach nourishment.

5.3 現地への適用とその状況

これらの検討の結果に基づいて、大阪府企業局では平成元年に一対のヘッドランドと中央部のそれとを完成し、粒径約 0.5 cm のれき状の底質を投入し養浜体制を整えている。その背後地の公園整備が終了した段階で、初期地形に準拠して養浜する予定となっている。しかし、すでに投入した養浜砂はこれまでの波浪の来襲によって変形してきたので、その汀線形状を空中写真などから読み取って Fig. 16 に示し、Fig. 15 に

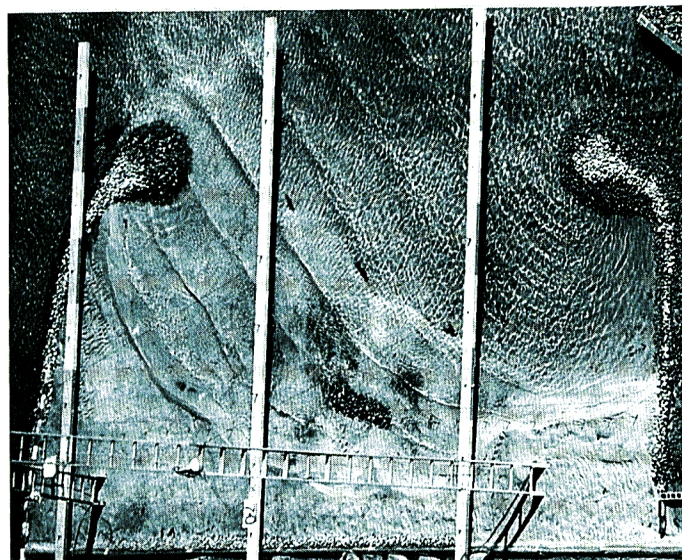


Photo. 1. An aerial view of stable sandy beach formed by three headlands in experiment where wave crests approaching the shoreline normally can be shown.

示した実験結果と比較してある。もちろん現在、養浜砂は仮置きの状態であり、また2年余の季節風波浪の影響を受けただけであるので、十分な変形はしていないが、その汀線形状は実験の結果とかなりよく似た傾向を示していることがわかるであろう。今後の継続的な調査による両者の比較から、この砂浜造成法の適用性が評価されるはずである。

なお、以上の実験的検討からすれば、養浜砂量に関係してそのわずかな部分が沖側の海底地形の形成のため流出するであろうが、その水深は十分漂砂の移動限界水深より深いのでほとんど問題にはならないと思われる。しかし、行政上の立場から現地への適用に当たっては養浜砂の流出防止のためにヘッドランドの先端を結んだ線上天端の低い潜堤を設置することにした。そのときの養浜後の海浜地形の変化を2次元実験で確かめた結果を **Fig. 17** に示す。これから養浜砂が潜堤の天端まで到達しない間でも、もし潜堤による渦の発生で養浜砂が流出することがあればそれは再び元の砂浜には戻らないし、また天端に到達してしまうと波

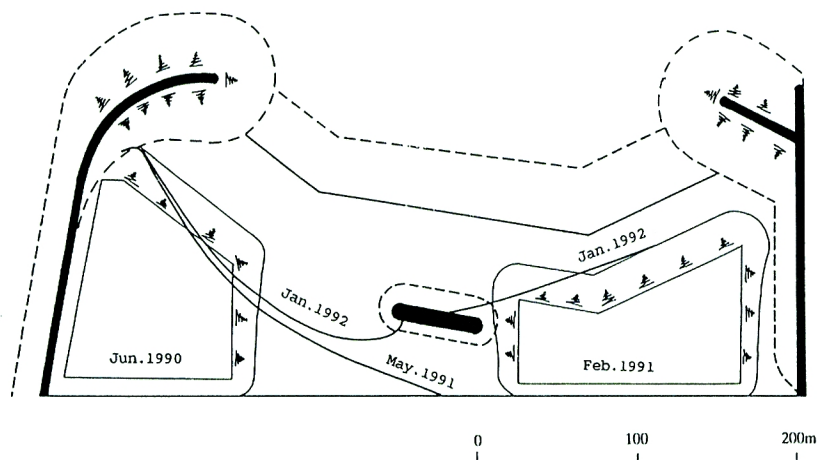


Fig. 16. Comparison of shoreline configurations of stable sandu beach formed in experiment and actual state under construction of beach nourishment as of 1992.

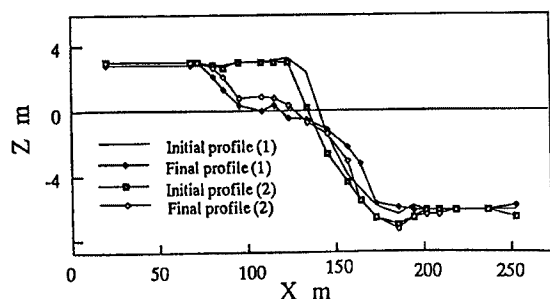


Fig. 17. Change in beach profile after beach nourishment in the case where submerged breakwaters were constructed.

浪条件によっては沖方向に養浜砂がかなり流失されるので、それは決して再び砂浜には戻れないことになるう。

6. 結 語

以上、比較的大水深の埋立地の前面に砂浜を造成する方法について、安定海浜の形成に基づく海岸侵食制御の考え方によって実験的に検討した結果と、それを現地に適用した状況について述べたが、その主要な結論を要約すれば、次のようになる。

- (1) 砂浜海浜の造成においては、養浜砂の流出防止のために従来離岸堤などを用いてきたが、これらによって砂浜海域を囲むようにすると、かえって離岸堤の開口部に生ずる強い冲向きの戻り流れによって養浜砂が流出することがわかった。
- (2) これに対して、安定海浜の形成を基礎とする一対のヘッドランドを設置して砂浜を形成させる方法では、それら2つのヘッドランドによってそれぞれ形成される砂浜が協同し融合できる条件を満たすと、そこに一つの安定な砂浜が形成されることが確認された。
- (3) 実験では、この条件を養浜砂量のほかヘッドランドの規模および配置を若干変えることによって見出したことになるが、所定の条件において比較的稳定な砂浜の形成と存在を見出すことに成功した。しかし、越波に対する防災上、砂浜中央部の浜幅を固定して台風時の異常波浪でも越波しないようにするため、そこに小島のような小さなヘッドランドを設置することにして、再び海浜変形の実験を継続した結果、2つの協同し融合した砂浜が形成されることが確認された。
- (4) 現地への適用では、行政上の立場から養浜砂の流出防止のため天端の低い潜堤を設置することになったが、現在ヘッドランドの施工は完了し、養浜砂が仮置きされており、すでに2年余の季節風波浪によって海浜変形が起こってきたが、その汀線形状は実験結果で予測されたものにかかなりよく似ているので、今後の継続的な調査が期待される。

最後に、本実験的研究は大阪府企業局からの依頼で一部（財）防災研究協会を通じて受託したが、安定海浜の形成に基づく海岸侵食制御論の適用として大水深海域での埋立地の前面に砂浜を造成できるかどうかという研究目的から実施したものである。本実験には、宇治川水理実験所長今本博健教授のご配慮のほか、大阪府企業局上山堅義技監（当時）、三井共同コンサルタント北野 章副社長はじめ、多くの方々のご協力をいただいたことを明記して感謝の意を表明する。

参 考 文 献

- 1) Brunn, P.: History and Philosophy of Coastal Protection, Proc. 13th ICCE, ASCE, 1972, pp. 33-74.
- 2) 土屋義人：海岸侵食の制御，土木学会論文集，第387号，1987，pp. 11-23.
- 3) Silvester, R.: A Look at Beach Erosion Control, Annual, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No 22A,

- 1979, pp. 19-30.
- 4) Wright, L. D. and Short, A. D.: Morphodynamics of Beaches and Surf Zones in Australia, in Handbook of Coastal Processes & Erosion, edited by Komar, P. D., CRC Press, 1983, pp. 35-64.
 - 5) Inman, D. and Fruttschy, J. D.: Littoral Processes and the Development of Shorlines, Coastal Engg., Santa Barbara Spec. Conf., ASCE, 1965, pp. 511-536.
 - 6) 土屋義人・芝野照夫：砂浜海岸の分類と底質特性について，第32回海岸工学講演会論文集，1985, pp. 326-330.
 - 7) 田中則男：砂浜の防災機能と安定機能，みなとの防災，第78号，1985, pp. 8-16.
 - 8) Tsuchiya, Y. and H. E. A. A. Refaat: Formation of stable sandy beaches; Theory and application, Jour. Water. Way., Port & Hab., Ocean & Coast. Eng., ASCE (in review).
 - 9) 土屋義人：安定海浜の形成と海岸侵食制御について—安定海浜工法とは？—，第22回海岸実務講習会講義集，1990, pp. 11-26.
 - 10) 土屋義人・陳 活雄・和田宙司：安定海浜の理論形状とその適用性，海岸工学論文集，第40巻，1993, pp. 358-362.
 - 11) Tsuchiya, Y., Y. Kawata, T. Yamashita, M. Kawasaki and S. Habara: Sandy beach stabilization; Preservation of Shirarahama beach, Wakayama, Proc. 23rd ICCE, ASCE, Vol. 3, 1992, pp. 3426-3439.
 - 12) Ito, M. and Y. Tsuchiya: Similitude of beach profile change, Proc. 20th ICCE, ASCE, Vol. 2, 1986, pp. 1196-1209.