

珊瑚礁リーフ海域における人工海浜の 安定化に関する検討

EXPERIMENTAL STUDY ON STABILIZATION
OF ARTIFICIAL BEACH IN CORAL REEF

平山克也¹・丸山晴広²・平石哲也³

Katsuya HIRAYAMA, Haruhiro MARUYAMA, Tetsuya HIRAIISHI

¹正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 波浪研究室(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²運輸省港湾技術研究所 水工部 波浪研究室(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 波浪研究室室長(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

For artificial beach constructed in coastal region facing a coral reef, the stability of sediment is most important. Meanwhile, the beach should be convenient for amenity activity and valuable to natural landscape. In order to protect the beach erosion in such artificial beaches, several countermeasures are proposed and carried out. The head land method is one of the most effective way for beach stability. This paper proposes the new effective arrangement of head lands to protect the artificial beach planed in coral reef employing the three dimensional experiments. In the experiment, the level of flow which caused the beach erosion are determined in the two dimensional cannel tests.

Key Words : Artificial Beach, coral reef, hydraulic experiment, water velocity

1. はじめに

本研究は、図-1に示す珊瑚礁リーフ海域における人工海浜の安定性について移動床平面模型実験より検討したものである。対象とした人工海浜は現在建設中である。本海浜で実施された既往の数値解析調査では、北側海浜において北から南に向かう沿岸流の発生および大規模な汀線、地形変化が懸念され、その対策として北側海浜に斜めに入射する波を遮蔽する150m突堤案の建設が提案されている。しかしながら人工海浜において設置される海洋構造物は、本来の機能である漂砂抑止効果はもちろんのこと、景観上も優れた構造であることが望ましく、本海浜においても恵まれた自然環境と共存できる新たな海浜安定化工法が求められている。そこで本研究では、人工海浜周辺に形成される波、流れ場に着眼して珊瑚礁リーフ海域における養浜砂の挙動特性を把握するとともに、島状ヘッドランド群を面的に配置した場合の漂砂抑止効果について検討した。

本研究で行った移動床水理模型実験の検討手順を

図-2に示す。本研究では、まず、事前に行われた断面模型実験およびブシネスクモデルによる波、流れ場の数値解析などの結果より再現実験に用いる沖波諸元を選定した。再現実験では、現地観測データが存在しないため、既往の数値解析調査による海浜変形の予測結果を再現事象として設定した。ここでは実験に用いた沖波諸元の妥当性を検証するとともに、沖波諸元の選定に用いた断面実験結果の平面移動床実験に対する適用性について詳細に検討した。

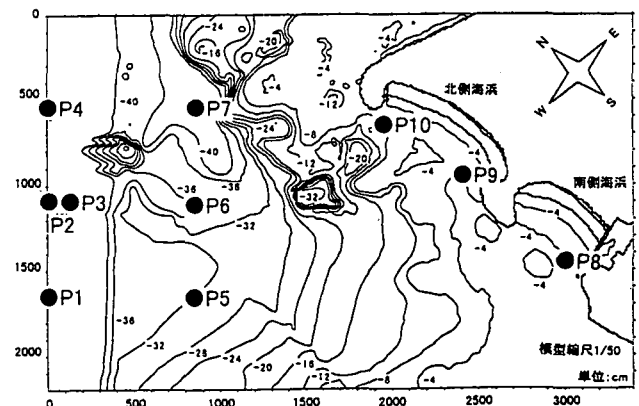


図-1 珊瑚礁リーフ海域

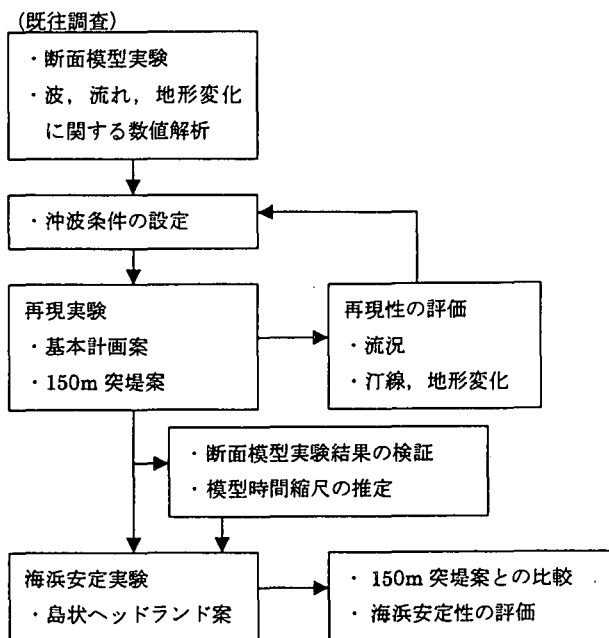


図-2 移動床模型実験の検討手順

最後に、漂砂抑止効果に優れ、かつ豊かな自然を維持し景観にも配慮した島状ヘッドランド案による海浜安定化工法に関する検証実験を行った。

2. 再現実験

(1) 実験条件

移動床実験における再現事象は、図-3 および図-4 に示す基本計画案および 150m 突堤案における海浜変形の既往数値解析結果である。ここでは、基本計画案において北側海浜で北から南に向かう沿岸流の発生、および大規模な汀線・地形変化が予測され、150m 突堤により海浜に斜めに入射する波を遮蔽することにより沿岸流の発生および大規模な汀線・地形変化が抑制されることが予測されている。

対象海域における現地波浪条件は、暴風波浪時で $H1/3=1.15\text{m}$, $T1/3=8.0\text{s}$ 、平常波浪時で $H1/3=0.9\text{m}$, $T1/3=7.0\text{s}$ である。本研究では縮尺 $1/50$ の歪なし模型を用いたため、フルードの相似則に従うと、実験波はそれぞれ $H1/3=2.3\text{cm}$, $T1/3=1.13\text{s}$ および $H1/3=1.8\text{cm}$, $T1/3=0.99\text{s}$ となる。しかしながら移動床模型実験においては模型砂の縮尺が満足されないため、現地の漂砂特性を再現するために沖波を歪ませる必要がある。そこで再現実験に先立ち、既往の移動床断面模型実験、波、流れ場の数値解析結果および平面模型を用いた予備実験の結果より、再現実験に用いる沖波諸元の選定を行った。

リーフ地形上の底質砂の波による挙動特性を観察した移動床断面模型実験の結果より、リーフ上の流

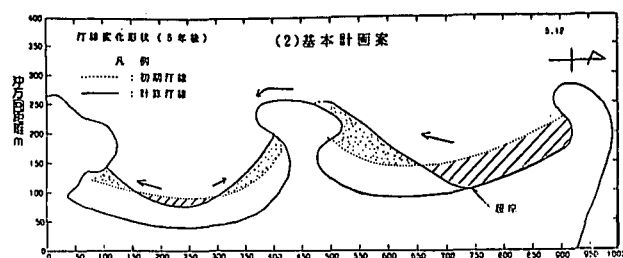


図-3 基本計画案における汀線変化予測

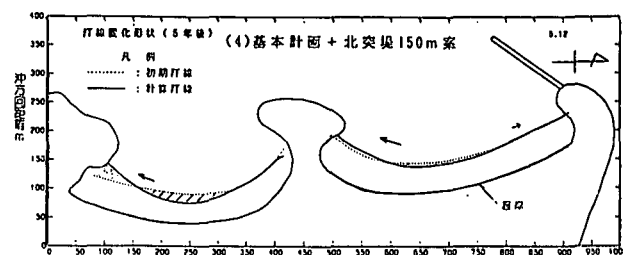


図-4 150m 突堤案における汀線変化予測

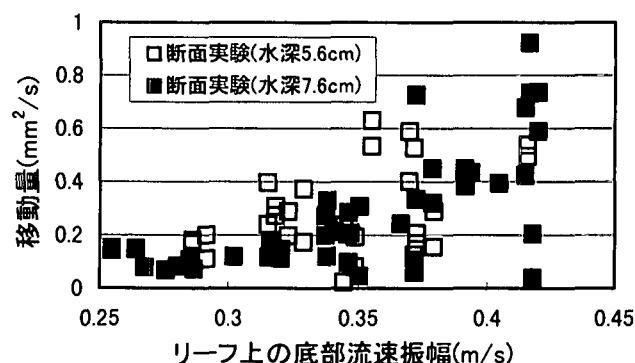


図-5 リーフ上の岸沖流速振幅と底質砂の移動量

速振幅と底質砂 ($d_{50}:0.2\text{mm}$, 比重:2.65) の移動量と間には図-5 のような関係が得られている (平山ら, 1998)¹⁾。この図より、リーフ上のある場所において底質砂が単位時間あたり水深が 0.2mm 変化したとき有意な地形変化が生じたとした場合、流速振幅が 0.34m/s 以上のとき、その地点において地形変化が生ずることがわかる。ここで、このときの流速振幅は移動限界流速と定義される。

一方、本研究で対象とした人工海浜周辺の波、流れ場をブシネスクモデルにより解析した研究結果 (平山ら, 1998)²⁾ は、再現事象として設定した基本計画案および 150m 突堤案の波、流れ場の既往数値解析結果と良い一致を示す。さらにこれらの数値解析結果は、後に示すように、平面模型を用いて実施した予備実験における波、流れ場の実験結果ともよく一致する。

これらの結果より、移動床平面模型実験において模型砂の挙動特性を相似する沖波諸元を推定することが可能である。ブシネスクモデルによる数値解析および平面模型を用いた予備実験において、暴風波

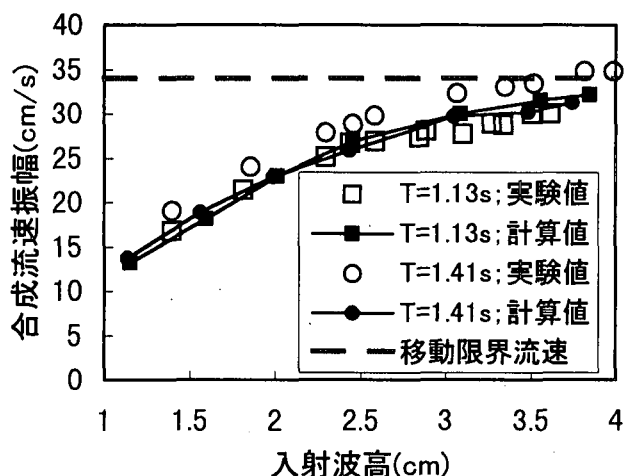


図-6 P10 地点における流速振幅の変化

浪時を想定して、 $H_1/3=1.3\sim 4.0\text{cm}$ 、 $T_1/3=1.13\sim 1.41\text{s}$ の不規則波を入射し、基本計画案において顕著な地形変化が予測されるP10地点での流速振幅を計測した結果を図-6に示す。図中の点線は移動床断面実験より得られた移動限界流速である。図より、周期を $T_1/3=1.13\text{s}$ とした場合には、波高を2倍程度まで増幅させても移動限界流速を上回る流速振幅が得られず、地形変化は期待されないことが予想された。しかし周期を $T_1/3=1.41\text{s}$ とした場合には、 $H_1/3=4.0\text{cm}$ とするとP10地点で観測される流速振幅は移動限界流速とほぼ一致し、顕著な地形変化が期待される。ただし、リーフ上の岸沖流れのみを対象とした断面実験で得られた流速振幅と底質砂の移動量の関係をもそのまま平面実験に適用することの妥当性については、次章において詳しく検証することとする。

以上のことより、再現実験に用いる暴風波浪時の沖波条件として、本研究では $H_1/3=4.0\text{cm}$ 、 $T_1/3=1.41\text{s}$ と設定した。このとき、フルードの相似則に対する沖波の歪み度は波高で1.74、周期で1.25であった。

一方、現地の人工海浜では、穏やかな波浪や荒天時の波浪の作用、さらには潮位変動や飛砂の影響を受けて海浜が形成される。つまり、このような海浜の形成過程を考えると、造波直後の海浜にいきなり暴風波浪を作用させるよりも、平常波浪を作用させた後に暴風波浪を作用させて海浜の形成過程を再現することが妥当である。そこで、再現実験では、平常波浪を10時間作用させた後に、暴風海浜を10時間作用させ、海浜変形の再現を試みた。ここで平常波浪の沖波条件は、移動床模型における平常波浪時の沖波の歪み度が暴風波浪時の沖波の歪み度と同様であるとみなすと、 $H_1/3=3.0\text{cm}$ 、 $T_1/3=1.27\text{s}$ と設定される。

(2) 実験方法

再現実験では、図-1中のP1～P10地点で波高を、P8～P10地点で流速を測定した。また人工海浜周辺における流況の観察には染料およびフロートを用い、写真、ビデオ撮影により記録した。

移動床部の地形変化の測定は、人工海浜を覆うように敷設された測定レール上に定点式砂面計を取り付けた測定台車を設置し、岸沖方向10cm間隔、沿岸方向25cm間隔の格子点における静水状態での砂面高を5時間ごとに測定した。また汀線変化の測定は、2.5時間ごとにメジャーにより測定した。さらに沿岸漂砂量の測定は、造波終了後に岸沖方向の5測線にサンドトラップを埋設し、5時間の造波を行うことにより実施した。

(3) 再現性の検討

ここでは、人工海浜における汀線、地形変化の再現性に着目して、実験波として選定された沖波諸元の妥当性を検証するとともに、移動床模型実験に対する時間縮尺の推定を行った。

図-7および図-8は、再現実験により得られた基本計画案および150m突堤案における汀線、地形変化を示したものである。先に示した図-3および図-4との比較より、基本計画案、150m突堤案とも再現性は良好であることがわかる。

なお、本研究における模型時間縮尺は、北側海浜における汀線、地形変化の速度に着目することによりつぎのように推定される。すなわち、暴風波浪時では、現地の波作用24時間が移動床模型においては8時間に相当し、平常波浪時では、現地の波作用1年が模型では40時間に相当するものと推定された。

3. 断面模型実験の評価

再現実験では、断面実験より得られたリーフ上の岸沖流れに関する移動限界流速、および平面波浪場における流速振幅の計算値より推測された沖波諸元により、人工海浜の汀線、地形変化に対する十分な再現性が得られた。しかしながら、沿岸流れが顕著であるリーフ上の平面波浪場において、断面実験結果を適用することに対する妥当性については、なおも詳細に検討しておく必要があるものと思われる。そこで、基本計画案を対象として、平面波浪場におけるリーフ上の流速振幅と底質砂の移動量の関係について詳細に検討した。

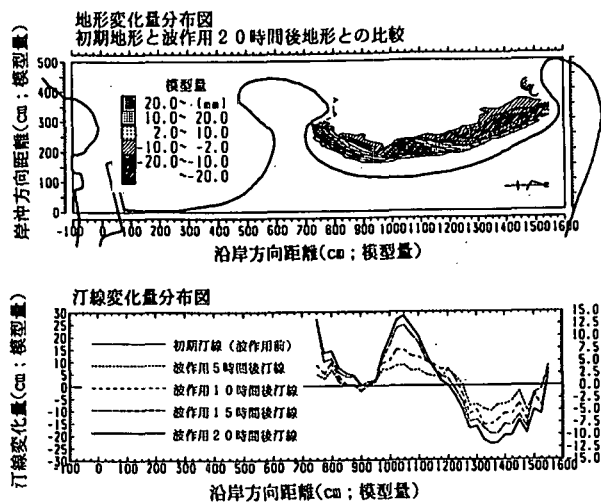


図-7 基本計画案における汀線，地形変化の再現性

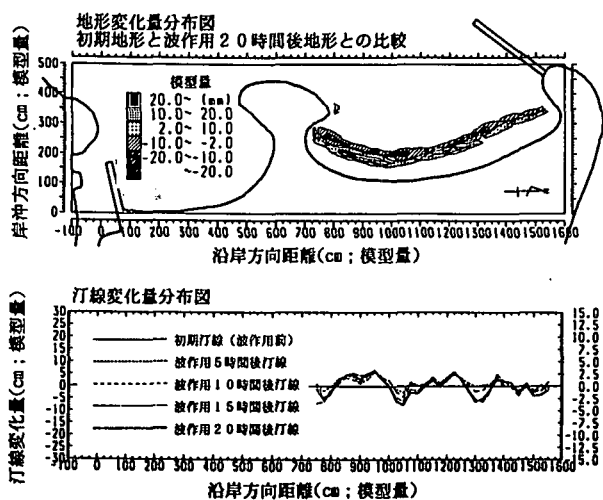


図-8 150m 突堤案における汀線，地形変化の再現性

(1) 検討方法

再現実験では，底質砂の移動量測定は定点式砂面計による砂面高測定により人工海浜全域にわたって実施されている．ここでは断面実験との比較を行うために，局所流が存在する区域を避け，検討対象区域を図-9に示す計32区域に設定した．図中，●印は一樣勾配斜面における砕波限界水深にほぼ対応する区域（模型量で水深約7cm）であり，■印は波打ち際の地形変化の影響を受ける区域（模型量で水深約5cm）である．なお，平面予備実験における砕波位置を図-10に示す．ここで，対象区域内における地形変化量は，格子点における水深変化量の絶対値に対象区域の面積を乗じた量(mm^3)と定義した．さらに，この地形変化量を波作用時間で除した値(mm^3/s)を単位時間あたりの移動量として定義した．

つぎに，対象区域における流速値は，流速計による計測は実施されていないため，ブシネスクモデル

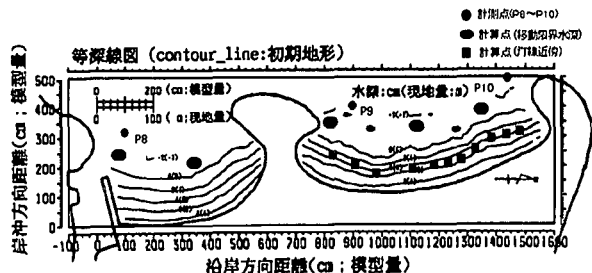


図-9 平面波浪場における移動量測定対象区域

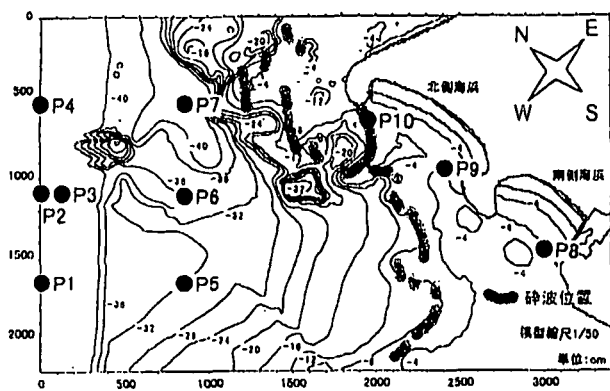


図-10 平面予備実験における砕波位置

による計算結果を用いることとした．なお，ブシネスクモデルによる計算精度の検証には，人工海浜近傍のP8, 9, 10地点における実験値および人工海浜周辺における流況の観察結果を用いた．

(2) 平面波浪場における底質砂の移動特性

各対象区域ごとの流速振幅の計算値と底質砂の移動量の実験値を用いて，リーフ上の平面波浪場における底質砂の移動特性を整理した結果を図-11に示す．なお，図には合わせて，図-5で示した底質砂の移動量を平面に単位換算した断面模型実験の結果を示す．汀線近傍の区域では，北側海浜の南側に Bar が形成されることにより海浜の北側と南側で漂砂特性に大きな差が生じただけでなく，波の遡上を考慮しない波浪解析モデルを用いて流速振幅を推定したために，プロットした点に大きなばらつきがみられた．しかしながら，これらの影響を比較的受けにくい砕波限界水深近傍の区域では，リーフ上の平面波浪場における流速振幅と底質砂の移動量との間に良い相関が得られた．一方，リーフ上の岸沖流れと底質砂の移動量の関係を明らかにした断面実験による結果と比較すると，近似直線の傾きに若干の違いが認められるが，平面波浪場においては波による水粒子運動によって漂砂が生じるほかに，地形の影響を受けて生じる沿岸流れにより浮遊砂が運搬されることを考慮すると，両者の傾向は概ね整合していると思われる．

したがって，リーフ上の平面波浪場における底質

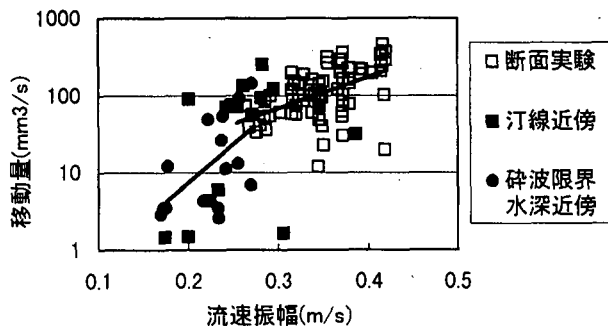


図-1 1 リーフ上の平面流速振幅と底質砂の移動量

砂の移動特性の推定にあたっては、まず断面模型実験により漂砂現象の直接の外力となる流速振幅と底質砂の移動量の関係を明らかにすることにより、砕波の有無に関わらず、対象地点における流速変動を計測してその地点における地形変化の有無をある程度判定することが可能であることがわかる。さらに、沿岸流れが生じている場合には、平面移動床における移動限界流速は断面実験で得られた値よりも小さくなることが予想される。なお、断面実験で底質砂が移動したと判定される移動量 $0.2\text{mm}^3/\text{s}$ は、平面模型に換算すると約 $100\text{mm}^3/\text{s}$ である。

4. 海浜安定実験

既往の数値解析調査により、本研究で対象とした人工海浜の養浜砂の安定化には、入射波を遮蔽するように沖に向かって150m突堤を設置する案が有効であることが推測された。しかしながら、環境保全あるいは景観および利用者への配慮の観点からは、より自然と調和した漂砂抑止施設の提案が求められている。そこで、人工海浜の計画区域内に島状のヘッドランド群を配置し、面的に沿岸漂砂を抑止する案について、その効果を検証した。

(1) 島状ヘッドランド案の選定

基本計画案を整形した平面移動床模型において、自然石と同様な水理条件を有すると考えられる砕石を用いて、いくつかの島状ヘッドランドを整形し、海浜安定化効果を得る最適な配置条件を試行錯誤的に検討した。その結果、図-1 2に示す配置案がもっとも有効であることが推測された。そこで本研究では、本案について海浜安定実験を実施した。

(2) 実験条件および方法

本研究で用いた平面移動床模型については、沖波の歪み度、および模型時間縮尺がすでに明らかとなっている。そこで再現実験と同様、まず整形された初期地形に対して平常波浪を10時間造波後、暴風波

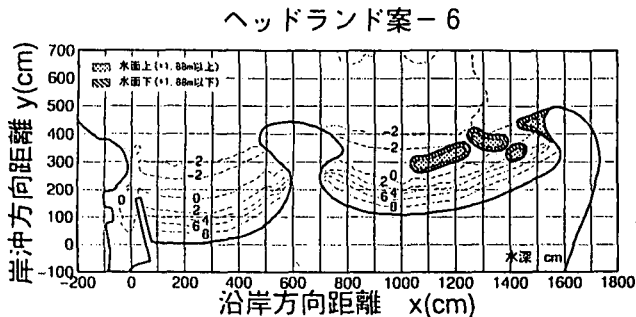


図-1 2 島状ヘッドランド案

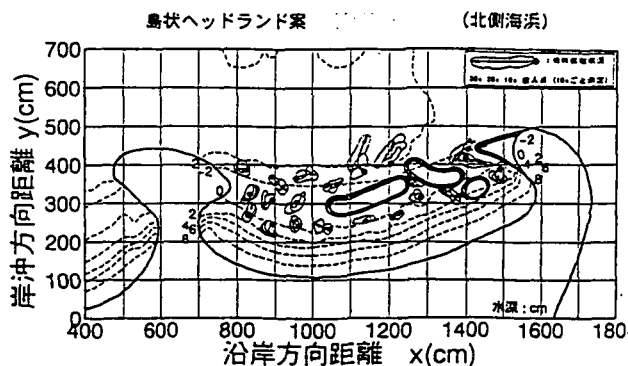


図-1 3 北側海浜周辺における流況分布

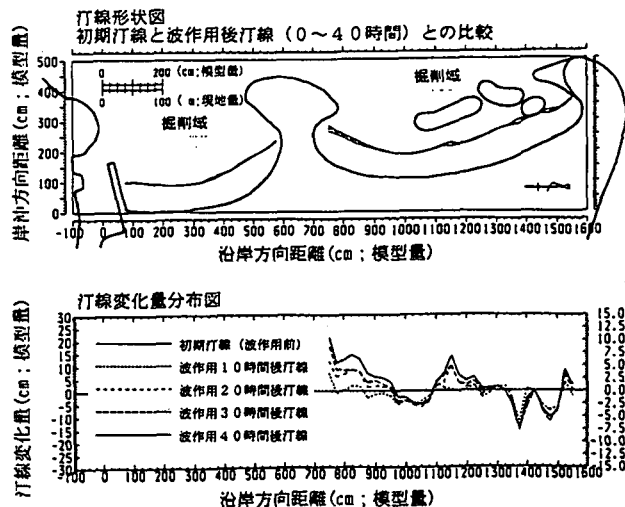


図-1 4 島状ヘッドランド案の汀線変化

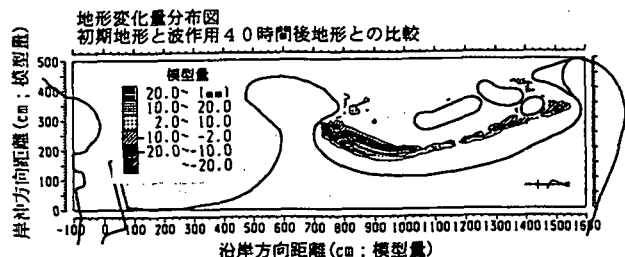


図-1 5 島状ヘッドランド案の地形変化

浪を10時間造波し、再現実験結果と定量的な比較が可能なデータを取得する。さらに現地1年間の海浜変形を予測するために引き続き平常波浪10時間と暴風波浪10時間の波を作用させて海浜の安定性を検討した。平面波浪場における波、流れの計測、および移動床部における地形変化および漂砂量の測定は再現実験と同様である。

(3) 島状ヘッドランド案の海浜安定効果

暴風波浪時の北側海浜周辺における流況分布を図-13に示す。図より、基本計画案においてみられた顕著な沿岸流れは観察されず、島状ヘッドランド背後、あるいは島状ヘッドランド開口部においても顕著な流れは観察されない。ただし、島状ヘッドランド群による波の遮蔽域より南側では、比較的速い流れがみられる。

造波開始から40時間後までの汀線変化を図-14に、地形変化を図-15に示す。図より、北側海浜において波作用時間の経過とともに島状ヘッドランド背後で小規模なトンボロが形成されることがわかる。一方、島状ヘッドランド群による波遮蔽域より南側では海浜が侵食され汀線が後退し、中央ヘッドランド基部で漂砂が堆積し汀線が前進している。しかし、波作用20時間後から40時間後（現地6ヶ月後から1年後）までの間における汀線変化および地形変化はわずかであり、海浜形状はほぼ定常に達しているものと考えられる。

以上の結果は、150m突堤案と比較することによりつぎのようにまとめられる。すなわち、島状ヘッドランド案は、150m突堤案に比べて造成初期の汀線および地形変化量は若干大きめであるが、波作用20時間後（現地6ヶ月後）には定常に達し、その後は150m突堤案と同様な海浜安定効果が期待される。したがって、初期の養浜形状を適切に設定することで、安

定な海浜を造成することが可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、平面移動床模型を用いて、珊瑚礁リーフ海域における人工海浜の安定化に対する検討を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- ①縮尺1/50の歪なし模型において、 $d_{50} : 0.2\text{mm}$ 、比重2.65の模型砂により移動床を整形したところ、底質砂の移動特性を相似する沖波諸元のフルードの相似則に対する歪み度は、波高で1.74、周期で1.25であった。
- ②既往の断面実験結果より得られたリーフ上の岸沖流れと底質砂の移動量の関係および移動限界流速 $0.34\text{mm}^2/\text{s}$ （模型縮尺1/50、模型砂、 $d_{50} : 0.2\text{mm}$ 、比重2.65）を平面移動床模型実験に適用することにより、対象地点における流速変動を計測してその地点における地形変化の有無をある程度判定することが可能であることが確認された。
- ③人工海浜の計画区域内に適切に島状ヘッドランドを配置することにより、沿岸流れの発生が抑制され、自然環境および景観に配慮しつつ安定な海浜を創出することが可能であることが確認された。

参考文献

- 1) 平山克也，丸山晴広，平石哲也：リーフ海岸の養浜砂の移動に関する基礎的な水理実験，海洋開発論文集，VOL. 14，pp. 191-196，1998。
- 2) 平山克也，上原功，永松宏一，平石哲也：珊瑚礁リーフにおける波と流れの計算法の適用性，海岸工学論文集，第45巻，PP. 161-165，1998。

(1999. 4. 19受付)