

# 東播海岸の西島地区における礫養浜の現地実験

門松 武\*・宇多高明\*\*・大杉広徳\*\*\*・伊藤弘之\*\*\*\*

## 1. まえがき

近年、ひとたび失われた砂浜を取り戻し、良好な環境を創出するために、全国各地で養浜が行われるようになった。筆者らも東播海岸において養浜工を実施し、砂浜の復元を図ってきた(門松ほか, 1990)。これにより東播海岸のかなりの区間で砂浜が復元され、復元された砂浜では様々な利用が行われるようになった。東播海岸での養浜では、海浜の利用条件も考慮して中央粒径  $d_{50} \approx 0.88 \sim 1.1 \text{ mm}$  の細砂が養浜材料として用いられ、また、養浜工は消波工として位置付けられている。ところで、最近東播海岸の西部に位置する西島地区でも養浜計画が立てられたが、ここでは東部の海岸と異なり、海底勾配が急であり、細砂を養浜材料に用いると流出し、沿岸部での漁業の障害となる恐れがあった。そこで新たに礫を用いた養浜を考えた。養浜工は消波工として位置付けられているが、礫は間隙が大きく、透過効果が著しいため、かなり高い消波効果を持つ。この意味より礫養浜はかなり効果的である。また、細砂に比較すると粒径が大きいために流出の可能性も低いと考えられる。このようなことから、西島地区では礫養浜が試験的に実施に移された。本研究は、西島地区での礫養浜の現地実験を通じて、波に対する礫浜の応答性を調べることを目的とする。

## 2. 東播海岸の西島地区の概要

西島地区周辺の地形図を図-1に示す。西島地区は播磨灘に面しており、海岸線に対する法線の方向はほぼSW方向である。西島地区の西2kmには明石市の埋立地がある。西島地区に隣接する江井ヶ島における気象観測(門松ほか, 1990)によれば、冬期(12~2月)にはW~WSWの風が、また夏期(6~8月)にはSEの風が著しく卓越する。さらに、沿岸のフェッチ分布によれば江井ヶ島ではW~WSW方向のフェッチが長く、また、SE方向は明石海峡の小さな窓を通してかなり長

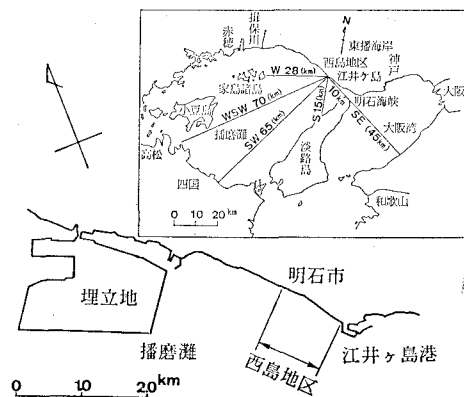


図-1 東播海岸の西島地区の位置

いフェッチとなる。これらのことから江井ヶ島ではW~WSWとSE方向からの入射波が卓越するが、図-1によれば、SE方向からの入射波に対して西島地区は江井ヶ島港の遮蔽域に入る。これらのことから西島地区では主としてW~WSW方向の入射波が卓越することになる。

西島地区周辺の海底地形を図-2に示す。西島地区は江井ヶ島港および赤根川に隣接し、また西島地区の西1.1kmには魚住漁港がある。2つの漁港によって東西を分かたれており、沿岸礫砂から見ると閉じた系になっている。海底形状は、西側の魚住漁港の東隣では比較的勾配が緩く、逆に西島地区では-5mまでの等深線が突き出し、急深である。このような地形になっている原因としては、当海岸では平均的に東向の沿岸礫砂が卓越するから、江井ヶ島港の防波堤により土砂移動が阻止されること、また赤根川が流入するために河川からの流出土砂が堆積し易いことが挙げられる。西島地区では以上のように海底勾配がかなり急であるから、東播海岸の東部地区で採用されている細砂による養浜は困難であり、このことが礫養浜を採用した一つの要因であった。

## 3. 礫養浜の現地実験

一般に、養浜工の材料としては細砂が用いられることが多い。その粒径は  $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ cm}$  のオーダーを有す

\* 正会員 建設省近畿地建姫路工事事務所長  
 \*\* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長  
 \*\*\* 正会員 建設省近畿地建姫路工事事務所  
 \*\*\*\* 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室

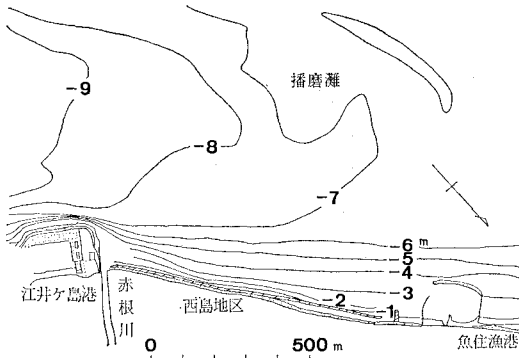


図-2 西島地区の沖合の海底地形

る。一方、従来から消波工としては異形コンクリートブロックが用いられてきているが、使用されるブロックの大きさは  $10^2 \text{ cm}$  のオーダーを有している。いま、新しいタイプの消波工として細砂のように波によって流出し易いものではなく、また異形コンクリートブロックほど大きくない、いわば中間的スケールを持った材料を考える。すなわち粒径として  $10^0$  のオーダーの礫を使う方法である。当然期待されるように、この場合波によって流出する可能性は低く、また異形ブロックのように景観上障害になることも少ないと考えられる。さらに細砂と異なり、礫は粒径が大きいため大きな浸透効果が期待される。一方、問題点としては、砕石材を用いると角ばった底質となること、また粒径が大きいと前浜勾配がかなり急になって海水浴などに利用しにくくなることが指摘される。しかし、前者は青森海岸の現地実験（村岡ほか、1990）で示されたように、波の作用下で礫が丸みを帯びることから供用開始後数年で問題は解決されると思われる。一方、後者の問題については今後の調査を待たねばならないが、粒径が非常に大きい場合の前浜勾配やバームの高さについては、必ずしも予測可能となっていないのが現状である。そこで、本研究では、現地実験によりこの点に着目して研究を進めた。

西島地区における礫養浜の平面形を図-3に示す。養浜区間の東側には赤根川の導流堤があり、これによって東側への礫の流出は防止されている。一方、この導流堤より西 200 m には捨石による長さ 119 m、先端の天端高 1.5 m の突堤が設けられている。養浜工が非常に広い範囲で同時に行われるのであれば沿岸方向への土砂流出を防止するための補助施設は必要ないが、ここでは 192.5 m の区間に限った養浜であったため、西への土砂流出を防止するため突堤を設けた。養浜には中央粒径 25 mm の礫を用いた。この礫により1990年9月に初期勾配 1/10 の一様斜面を整形した。この場合、T. P. +2.0 m 以高は利用上の便も考えて中央粒径 0.88 mm の砂で養浜した。すなわち2つの材料による複合断面で

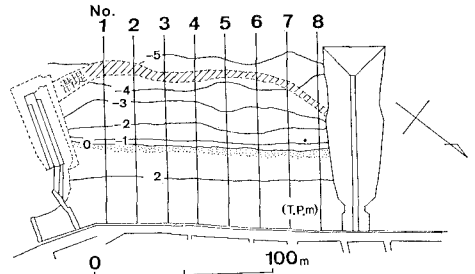


図-3 礫養浜の平面形と測線配置

ある。礫による養浜の場合、投入礫は岸向きに移動し、沖への移動はないと予測されたが、工事のし易さやこの海域が漁場となっておりそこへの土砂移動は防止しなければならないことから、養浜区間の沖合には捨石による低い潜堤を設けた（図-3参照）。また養浜後、図-3に示すように 20 m 間隔に設けた 8 本の測線に沿って深浅測量を繰り返し、海浜断面形の変化を調べた。なお、図-3 の等深線は養浜直後の1990年11月15日の海浜形状を示す。

前浜部への土砂堆積には波浪の作用と潮位が重要なパラメータとなる。そこでこれらのパラメータの時系列変化の例として1990年12月の測定結果を図-4に示す。上段より順に江井ヶ島での風速、東二見での潮位、江井ヶ島での有義波高・周期を示す。東播海岸では特に西からの季節風が吹くと高波浪が発生する。1 m 以上の有義波高は12月中に 4 期間出現しているが、このときは高風速が出現している。一方、有義周期には顕著な特徴は見られず、ほぼ 3.5~5.0 s の間で不規則に変動している。一方、潮位は周期的に変動しているから、高潮位と高波浪が同時に作用したときが問題となる。観測期間中の波浪・潮位データの一例は図-4に示すとおりであるが、潮位は周期的に変動しているのに対し、高波浪はごく限られた期間にのみ出現している。一方、海浜地形変化を引き起こすのは、ある程度のエネルギーレベルを持った波浪が来襲したときに限られる。そこでここでは有義波高が 0.8 m を仮の限界条件として、まず波高がこ

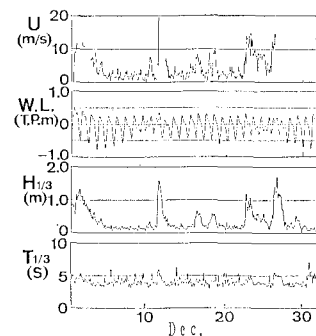


図-4 風速、潮位、有義波高・周期の経時変化の一例

の値を越えた場合の観測データを選び出した。これによると養浜の実施後、 $H_{1/3}=0.8\text{m}$ 以上の波浪は全体で80回出現した。同時に、前浜地形変化は潮位があまり低いときは生じにくいから、潮位が T. P. 0m 以下のデータを除くと、最終的にデータの出現回数は表-1に示すように44回となった。表-1には、観測日時、江井ヶ島で測定された有義波高・周期、東二見での潮位、前浜勾配およびバーム高の測定値を示す。

表-1 波高, 周期, 潮位, 前浜勾配, バーム高の一覧

| 月 日 時    | 波高<br>(m) | 周期<br>(s) | 潮位<br>(T.P.m) | 前浜<br>勾配 | バーム<br>高(m) | 測量結果               |
|----------|-----------|-----------|---------------|----------|-------------|--------------------|
| 10 26 16 | 0.88      | 4.5       | 0.91          | 0.17     | 1.92        |                    |
| 11 4 18  | 0.94      | 4.1       | 0.57          | 0.16     | 1.51        |                    |
| 11 4 20  | 1.03      | 4.6       | 0.64          | 0.16     | 1.75        |                    |
| 11 4 22  | 1.07      | 4.5       | 0.48          | 0.15     | 1.58        |                    |
| 11 9 20  | 1.03      | 4.3       | 0.93          | 0.15     | 1.96        |                    |
| 11 9 24  | 0.90      | 4.2       | 0.34          | 0.16     | 1.29        |                    |
| 11 10 2  | 0.88      | 4.4       | 0.19          | 0.16     | 1.17        |                    |
| 11 10 4  | 0.80      | 3.9       | 0.13          | 0.17     | 0.96        |                    |
| 11 10 14 | 1.11      | 4.9       | 0.23          | 0.15     | 1.46        |                    |
| 11 10 16 | 0.98      | 4.7       | 0.56          | 0.16     | 1.67        |                    |
| 11 10 18 | 0.92      | 4.3       | 0.60          | 0.16     | 1.58        |                    |
| 11 10 20 | 0.82      | 4.0       | 0.35          | 0.16     | 1.21        |                    |
| 11 10 22 | 0.88      | 3.9       | 0.05          | 0.16     | 0.91        | 11月15日             |
| 12 1 6   | 0.86      | 5.1       | 0.24          | 0.17     | 1.38        | $\tan\alpha=0.29$  |
| 12 1 8   | 0.84      | 4.8       | 0.64          | 0.17     | 1.69        | $B_h=2.66\text{m}$ |
| 12 1 10  | 0.80      | 4.7       | 0.72          | 0.17     | 1.73        |                    |
| 12 1 18  | 1.16      | 4.8       | 0.61          | 0.15     | 1.84        |                    |
| 12 1 20  | 0.97      | 4.5       | 0.54          | 0.16     | 1.59        |                    |
| 12 1 22  | 1.10      | 4.8       | 0.15          | 0.15     | 1.35        |                    |
| 12 2 8   | 1.10      | 5.3       | 0.37          | 0.16     | 1.70        |                    |
| 12 2 10  | 1.09      | 4.8       | 0.63          | 0.15     | 1.82        |                    |
| 12 2 12  | 1.12      | 4.7       | 0.61          | 0.15     | 1.79        |                    |
| 12 2 14  | 0.86      | 4.2       | 0.47          | 0.16     | 1.40        |                    |
| 12 2 16  | 0.85      | 4.0       | 0.31          | 0.16     | 1.18        |                    |
| 12 2 18  | 0.99      | 4.5       | 0.37          | 0.16     | 1.43        |                    |
| 12 2 20  | 0.84      | 4.6       | 0.29          | 0.17     | 1.30        | 12月4日              |
| 12 11 14 | 0.84      | 3.6       | 0.25          | 0.16     | 1.03        | $\tan\alpha=0.36$  |
| 12 11 16 | 1.37      | 5.4       | 0.53          | 0.15     | 2.04        | $B_h=2.96\text{m}$ |
| 12 11 18 | 1.57      | 5.9       | 0.49          | 0.14     | 2.25        |                    |
| 12 11 20 | 1.46      | 5.8       | 0.10          | 0.15     | 1.77        | 12月17日             |
| 12 22 18 | 0.91      | 4.1       | 0.24          | 0.16     | 1.17        | $\tan\alpha=0.29$  |
| 12 22 20 | 1.17      | 4.5       | 0.09          | 0.15     | 1.15        | $B_h=2.80\text{m}$ |
| 12 23 2  | 0.81      | 4.4       | 0.06          | 0.17     | 1.01        |                    |
| 12 23 12 | 0.88      | 4.5       | 0.07          | 0.17     | 1.08        |                    |
| 12 26 10 | 1.08      | 4.7       | 0.05          | 0.15     | 1.21        |                    |
| 12 26 12 | 1.28      | 5.3       | 0.08          | 0.15     | 1.51        |                    |
| 12 26 14 | 1.42      | 5.5       | 0.20          | 0.14     | 1.76        |                    |
| 12 26 16 | 1.22      | 5.1       | 0.32          | 0.15     | 1.66        |                    |
| 12 26 18 | 1.23      | 5.2       | 0.27          | 0.15     | 1.65        |                    |
| 12 27 6  | 1.18      | 4.9       | 0.16          | 0.15     | 1.43        |                    |
| 12 27 8  | 1.13      | 5.0       | 0.15          | 0.15     | 1.42        |                    |
| 1 5 18   | 0.86      | 4.2       | 0.02          | 0.16     | 0.95        |                    |
| 1 6 12   | 0.94      | 5.0       | 0.07          | 0.16     | 1.23        |                    |
| 1 6 14   | 0.90      | 4.6       | 0.26          | 0.16     | 1.30        | 1月11日              |
|          |           |           |               |          |             | $\tan\alpha=0.4$   |
|          |           |           |               |          |             | $B_h=3.04\text{m}$ |

次に、代表3測線に沿う海浜断面形の変化を図-5に示す。図-3に示したように No. 2 は東突堤に、また No. 7 は西突堤に近接する。また No. 5 は養浜区間のほぼ中央に位置する。筆者らは、同じ東播海岸の林崎漁港の西隣りでの養浜実験を通じて、この海岸への入射波の卓越方向が季節的に変動し、これによって汀線にも cyclic なモードの振動が見られることを示した(門松ほか, 1990)。当海岸における地形変化の分析においてもこのような汀線変動の可能性が残されているので、突堤間で3測線を選んだ。図-5によればいずれの断面においても  $-3.5\text{m}$  まで汀線の間に侵食され、侵食された底質が前浜へ打ち上げられたことが分かる。この結果、ほぼ一様勾配(約 1/10)をもった海浜断面形は、勾配約 1/3 と急勾配になり、また高さ約 3m に達する高いバームが形成された。礫養浜を行った区域の最も沖合には小潜堤があったが、ここより沖合へと移動する礫は見られなかった。3断面の変形状況が極めて良く似ていることは、養浜後の断面変化が波による岸向き漂砂によるものであることを示している。その場合、礫に対する地形変化の生ずる移動限界はほぼ  $-3.5\text{m}$  にあったことになる。

図-6には養浜区間のほぼ中央に位置する測線 No. 5 における代表的な等深線までの基準点からの距離(等深線距離)の経時変化を示した。 $-4\text{m}$  の等深線の動きはわずかであるが、 $-3.0\sim 0.0\text{m}$ の間では全般に右下がりの変化を示し、陸上部の  $0\sim 2.5\text{m}$  の等深線の動きとまったく逆モードである。このような変形の結果として  $-2.0\text{m}\sim 2.5\text{m}$  の間の等深線の間隔は非常に密になった。

図-5に示したように海浜断面は平均海面以下で侵食され、侵食土砂は前浜へ打ち上げられた。この場合、1990年11月の完成断面を基準として断面積の経時変化を求めると図-7となる。いずれの断面とも良く似た変化を示し、堆積断面積は3断面で約  $50\text{m}^2$  とほとんど同一

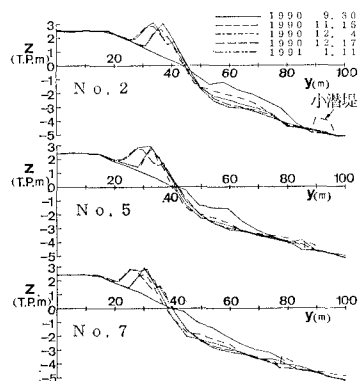


図-5 測線 No. 2, 5, 7 における海浜断面形の経時変化

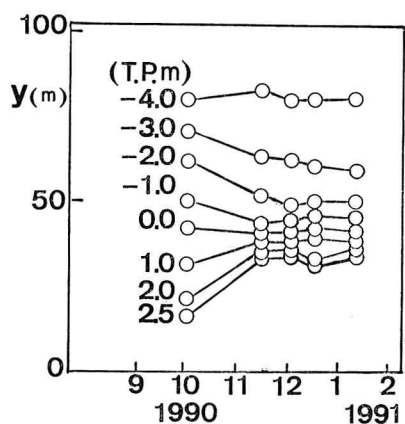


図-6 測線 No. 5 における等深線距離の経時変化

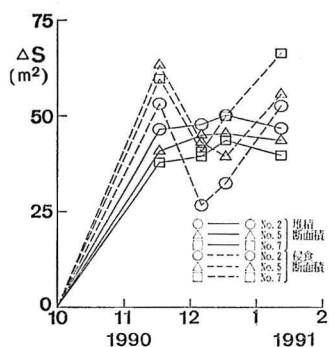


図-7 侵食・堆積断面面積の経時変化

の値である。侵食断面面積も堆積断面面積とほぼ同程度であるが、かなり大きな変動を有する。

以下、現地海浜の状況を写真により調べてみる。写真-1 は養浜完成約2ヶ月後の1990年11月26日の海浜状況である。この時点までに多量の礫が前浜へ打ち上げられ、小高いバームが形成されていたことが分かる。写真は西突堤より東向きに撮影されたものであるが、突堤の隣接部を除けば海浜変形は沿岸方向にはほぼ一様に生じている。写真-1 の撮影後7日たった12月2日11時の海浜状況を写真-2 に示す。表-1 によれば、12月2日10時には  $H_{1/3}=1.09\text{ m}$ 、 $T=4.8\text{ s}$ 、12時には  $H_{1/3}=1.12\text{ m}$ 、 $T=4.7\text{ s}$  とかなりの高波浪が観測されていたから、写真-2 の撮影時にもほぼこれらと同程度の波浪が作用していたと考えられる。またこの時の潮位は表-1 によれば T. P. +0.62 m である。入射波は礫浜の基部付近で碎波し、それが遡上したことが分かる。同様に、写真-3 は12月26日14時30分の海浜状況である。表-1 によると、この時の波浪条件は  $H_{1/3}=1.42\text{ m}$ 、 $T=5.5\text{ s}$  であり、写真-2 の場合と比較して潮位は約 0.4 m 低いが、周期が長く、波高も高いのでうちあげが高い傾向がある。さらに、写真-2、3 に共通して見られるように、

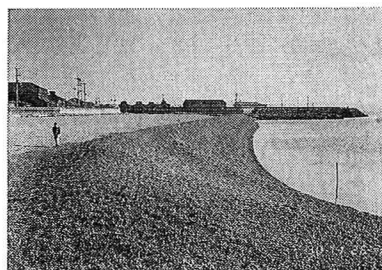


写真-1 礫養浜区間の状況 (1990年11月26日14時)



写真-2 高波浪のうちあげ状況 (1990年12月2日11時)



写真-3 高波浪のうちあげ状況 (1990年12月26日14時30分)

養浜区間の前方に見える護岸+消波工の区間では護岸前面での碎波によってしぶきが発生しているのに対し、礫浜区間では海水が急激に浸透するためしぶきの発生がほとんど見られないのが特徴である。このように礫浜はしぶきの発生防止にも大いに有効である。

#### 4. 考 察

堀川ほか (1975) は、式 (1) により定義される  $C$  の値により、タイプ I、II、III 型の海浜断面変化の分類を試みた。タイプ I は前浜が侵食され、沖浜に土砂が移動するケース、タイプ II は碎波帯内が侵食され、バームとバーとが同時に形成されるケース、そしてタイプ III は岸向き漂砂が卓越してバームが形成されるケースである。

$$C = (\tan \beta)^{0.27} (d/L_0)^{-0.67} (H_0/L_0) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $H_0(\text{m})$ : 沖波波高、 $L_0(\text{m})$ : 沖波波長、 $\tan \beta$ : 海底勾配、 $d(\text{m})$ : 海浜材料の中央粒径であり、タイプ I と II は  $C=18$  によって、またタイプ II と III は  $C=9$

によって分類されるとしている。西島地区の礫養浜後の断面変化をタイプ分類にあてはめると、浅海域の底質が前浜上へうちあげられ、バームが形成されたことからタイプⅢに分類される。西島地区の場合、図-5によれば海底勾配はほぼ0.05であり、また波浪条件は表-1に与えられているから、これらより $C$ を求めると、 $C=1.4\sim 2.2$ となり、明らかに堀川の分類のタイプⅢに入ることが確認される。

また、静水面を基準としたバーム高 $B_h$ に関して、武田・砂村(1982)は式(2)を提案した。

$$B_h = 0.125 H_b^{5/8} (g T^2)^{3/8} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $H_b(m)$ : 砕波波高,  $g$ : 重力加速度,  $T(s)$ : 周期である。同様に、前浜勾配 $\tan \alpha$ に関して、Sunamura (1989)は式(3)を提案した。

$$\tan \alpha = \frac{0.12}{(H_b / g^{1/2} d^{1/2} T)^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

なお、式(2)、(3)に含まれる砕波波高の計算には、Sunamura and Horikawa (1974)の式(4)が利用できる。

$$H_b / H_0 = (\tan \beta)^{0.2} (H_0 / L_0)^{-0.25} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(2)、(3)によれば、海底勾配、有義波高、周期および潮位が与えられれば、前浜勾配とバーム高が計算できる。本来、式(2)、(3)は主として海浜材料として砂を用いた場合の公式であるが、ここで用いた礫の場合にも適用可能と考えて計算を行い、実測値との比較を試みた。潮位、波浪データは2時間おきに与えられているが、バームの発達には潮位と波高がともに比較的高い条件で生ずると考えられるので、潮位がT.P. 0m以上で、かつ $H_{1/3} \geq 0.8m$ の条件を満たす場合について計算を行い表-1に示した。前浜勾配の計算値は、波に対する応答性がよく、またその絶対値が実測値の約51%とはるかに小さい。またバーム高の実測値は最終的には約3.04mにも達したが、計算では最大で2.2mであって、実測値の72%でしかない。すなわちこの場合も過小評価となった。このように礫の場合については、式(2)、(3)による計算では前浜勾配およびバーム高とも過小評価となってしまうことが分かった。

本計算では、前浜地形変化の因子として有義波高を考えたが、より出現頻度の小さい例えば1/10最大波高により前浜地形が支配されと考えれば、式(2)によるバーム高の計算結果を実測値と合わせることはできる。しかし、この場合式(1)で得られる前浜勾配はさらに小さくなり、矛盾が生じてしまう。

一方、前報(門松ほか, 1990)で述べた松江地区での養浜では前浜勾配が約1/8、バーム高が約1.8mと得られている。これに対し上述の方法を同様にしてあてはめた。松江地区は西島地区の東わずか5kmに位置する

ので、波浪条件は西島地区とあまり変わらないと考えられる。このため、西島地区での波浪および潮位条件を代用して、式(2)、(3)より前浜勾配およびバーム高を計算した。この時、中央粒径は1mm、海底勾配は1/30とした。結果は $i=0.08$ 、 $B_h=2.2m$ となり、前浜勾配についてはいくぶん緩く、バーム高についてはやや高い値となったが、全体に対応関係は礫の場合よりも良くなっている。以上のことから、式(2)、(3)は砂浜には適用できるが、礫浜への適用には問題が残されていると言える。

## 5. 結 論

①東播海岸の西島地区での礫養浜の現地実験によれば、 $d_{50}=25mm$ の投入礫は前浜へ打ち上げられ、前浜勾配が約1/3となり約3mの頂高を持つバームが形成された。このバームは利用上からは勾配が急すぎる傾向があるが、消波工としては効果的であり、隣接の消波ブロックの設置区間と比較するとしぶきの発生防止にも大きく役立つことが分かった。また、礫は岸方向へのみ移動し、沖向き移動は見られなかった。

②海浜断面の変化は堀川ほかの分類のタイプⅢ型に属した。タイプ分類を堀川ほかの方法により検討したところ、Ⅲ型のタイプは判定係数 $C$ が9以下となる必要があるが、実測値では $C=1.4\sim 2.2$ となり、明らかにこの条件を満足すること、すなわちこの方式で分類がよくなされることが分かった。

③前浜勾配とバーム高に関する砂村の式と実測値を比較した。これによると、底質が砂の場合には計算値と実測値はほぼ対応したが、礫の場合従来の公式は両者とも過小評価してしまうことが明らかになり、礫の場合の算定法についてはさらに検討の必要性があることが分かった。

## 参 考 文 献

- 門松 武・宇多高明・藤原 要・時沢信一 (1990): 東播海岸における養浜後の海浜地形変化, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 484-488.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋 (1975): 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 329-334.
- 村岡憲司・宇多高明・瀧美雅裕 (1990): 青森海岸における礫養浜および雑石斜面の打ち上げ高・飛沫に関する現地実験, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 76-80.
- 武田一郎・砂村継夫 (1982): バームの形成条件と高さ, 地形, Vol. 3, No. 2, pp. 145-157.
- Sunamura, T. (1989): Sandy Beach Geomorphology Elucidated by Laboratory Modeling, Applications in Coastal Modeling, pp. 159-213.
- Sunamura, T. and Harikawa, K. (1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th ICCE, ASCE, pp. 920-938.