

高波浪によるバーの大規模変動の観測

——石川海岸の離岸堤・人工リーフ沖の地形変化——

武藤和宏*・宇多高明**・島 敏明***・岡本俊策****

1. ま え が き

石川海岸は、日本海に面した手取川扇状地の外縁をなして広がる砂浜海岸である。この海岸のうち、手取川河口部を中心とする約 19 km の区間は、激しい侵食を受けてため直轄海岸として海岸保全工事が進められてきている。石川海岸の手取川河口より北東約 7 km にある徳光地先では、近年、海浜レクリエーションゾーンの整備が進められている。その整備に伴い、従来からの海岸侵食の防止のみではなく、レクリエーション空間を確保するために離岸堤の沖出しや人工リーフの建設が進められている。ところで、こうした消波構造物はかなり大きな規模となるので、構造物の設置が周辺海浜に及ぼす影響について十分注意を払う必要がある。そこで、工事に際しては深淺測量を中心とするモニタリング調査を進めている。一方、石川海岸はバーの発達のない海岸としても有名である（例えば、石田ほか、1984）が、たまたま調査期間の1990年～1991年には冬期の異常波浪により沖方向へのバーの大規模な移動が起こった。構造物周辺での海浜変形は勿論のこと、こうした異常波浪に伴う大規模な海浜地形変化の実態を明らかにすることは、海浜変形の予測手法について検討する上で非常に重要なことである。そこで、本研究では離岸堤と人工リーフの建設に伴う海浜変形とともに、異常波浪によるバーの大規模変動について検討したのでここに報告する。

2. 石川海岸の波浪特性

徳光地先では海岸の沖合、約 1.5 km の位置（水深 15 m）に設置された超音波式波高計により波浪観測が実施されてきている。また、徳光地先の北東 12 km にある金沢港でも超音波式波高計（設置水深 20.2 m）による波浪観測が行われている。1987年から1989年までの月別最大有義波高と周期を表-1に示す。徳光地先のデータでは1987年、1988年に欠測期間があったので、1987年と1988年に関しては金沢港のデータを示す。表に明らかのように、石川海岸では冬期風浪が卓越し、10月～3月に高波浪が出現する。同様に、1989年の10月から12月までの期間、徳光地先沖で超音波式波向計により観測された波向の頻度分布を表-2に示す。これによると、この海岸では NNW と N 方向の入射波が卓越していることがわかる。徳光地先付近における平均海岸線に対する法線方向は N52°W（NWより反時計回りに7°）であることから、この海岸では冬期風浪時、時計回りの方向からの入射波が卓越することになる。そしてこの入射波は西向きに卓越沿岸漂砂を生じさせる。

表-1 月別有義波高および周期（1987年～1989年）

年	観測場所	項目	1月	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1987	金沢港	H _{1/3} (m)	5.30	4.95	6.87	3.66	2.32	1.60	2.44	4.12	4.64	4.41	4.68	5.60
		T _{1/3} (s)	10.4	9.8	11.0	9.5	7.2	5.3	7.2	9.9	10.6	10.7	9.0	10.0
1988	金沢港	H _{1/3} (m)	5.78	5.96	4.42	2.05	2.50	2.54	2.16	1.24	1.88	5.85	5.86	6.13
		T _{1/3} (s)	9.4	10.4	9.4	7.3	6.8	7.7	6.2	5.0	6.3	11.8	10.1	11.0
1989	徳光地先	H _{1/3} (m)	3.79	3.23	2.80	2.57	2.48	1.53	0.98	2.18	2.06	3.40	4.37	3.75
		T _{1/3} (s)	8.6	9.0	8.8	8.4	8.2	7.0	4.9	7.6	8.9	11.3	11.3	11.9

表-2 月別波向頻度表（1989年10～12月）

波向	WNW	NW	NNW	N	NNE	静穏	不明	計
10月	1.5	5.0	13.7	38.3	7.4	19.8	14.4	100
11	0.3	12.4	20.4	45.6	0.1	12.8	8.5	100
12	0.1	9.8	27.3	54.6	0.0	0.1	8.1	100

* 正会員 建設省北陸地方建設局金沢工事事務所長
 ** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長
 *** 建設省北陸地方建設局金沢工事事務所流域対策課長
 **** 建設省土木研究所海岸研究室 部外研究員（技研興業（株））

3. 深浅図の比較

徳光地先における深浅測量の測線配置を構造物の建設経緯とともに図-1に示す。測線番号は調査区域の西端が No. 90+00, 東端が No. 97+50 であり, 測線間隔は 25 m である。図-1に示すように, 2基の沖合離岸堤のうち西側をA, 東側をBとし, それより岸近くの離岸距離 100~150 m にある離岸堤を西から順に C, D, E, F, G とする。以下では, 1987年10月, 1989年8月, および 1991年2月の深浅データを使用する。

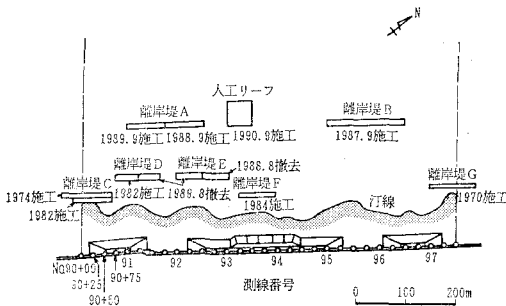


図-1 石川海岸徳光地先における観測測線と離岸堤・人工リーフの建設経緯

離岸距離約 250 m の離岸堤Bが設置された直後の1987年10月における深浅図を図-2に示す。この段階では西側に位置する離岸堤Aはまだ設置されていないが, 岸側のC~Gは既に設置済である。図-2によると, 離岸堤Bの周辺は浅いのに対し, その西側には-5 m の等深線により囲まれた細長い深みが斜め岸向きに延びている。一方, 離岸堤沖の -5~-7 m の等深線は離岸堤Bのわずかに西側でやや沖向きに突出しているものの, 全体に沿岸方向に滑らかに延びている。離岸堤Bを境にして西

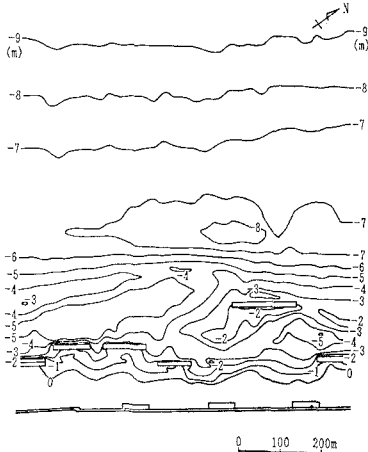


図-2 等深線図 (1987年10月)

側で深みが形成され, 東側で浅い区域が形成された点は, 冬期に発達する西向きの沿岸漂砂が離岸堤Bにより阻止されたことを強く示唆している。

離岸堤Aの西半分が工事中であった1989年8月の深浅図を図-3に示す。離岸堤Aの東半分は1988年9月に既に完成している。逆に, 離岸堤Eの東半分が1988年8月に, 離岸堤Dの東半分と離岸堤Eの西半分が1989年8月に撤去されている。離岸堤A, Bの岸側では堆砂が生じて全体に水深が浅くなり, これと対照的にそれらの開口部では等深線が湾入している。離岸堤A, Bの沖合では, バー・トラフが沿岸方向に大きく変動しており, 特にトラフの最深部の位置が離岸堤A, Bの沖では沖側に位置し, 開口部では岸側に寄っている。このような等深線の特徴は, 離岸堤の存在によって沿岸流が蛇行し, それに応じて形作られたように見える。

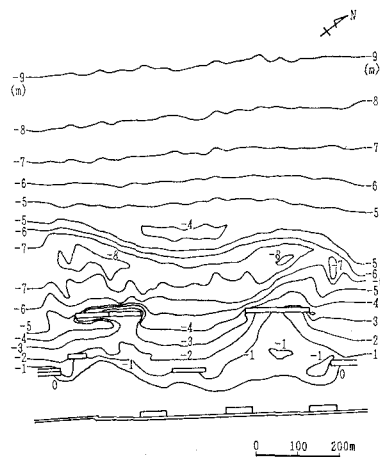


図-3 等深線図 (1989年8月)

図-4は, 1991年2月の深浅図である。これによると2つの大きな変化が見られる。第1の特徴は, 離岸距離 450~500 m の水深約 5 m にあったバーが, 約 650 m 沖へと大きく移動したことである。この原因は, この間に高波浪が来襲したためであるが, これについては次節以下で詳細な分析を試みる。第2の特徴は, 人工リーフの設置に伴うものであって, 人工リーフの背後で-2 m の等深線が舌状に前進し, 一方, 離岸堤Aと人工リーフの間で局所洗掘が見られることである。また, -3 m の等深線は人工リーフの東側では前進しているものの, 西側では後退していることも指摘できる。このような人工リーフ周辺での等深線の特徴は, 時計回りの方向からの入射波が人工リーフ上で碎波することにより岸向き流れが発生し, さらにその流れが開口部から離岸流となって沖向きに流れ出る際生じた局所洗掘 (宇多ほか, 1989) を表わすと考えられる。

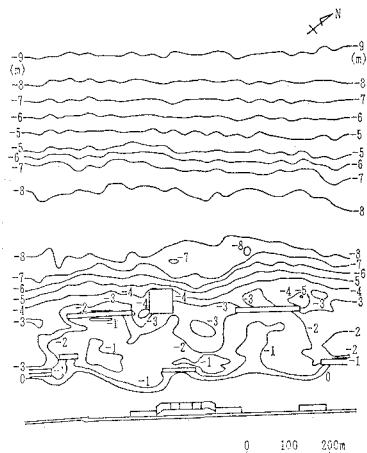


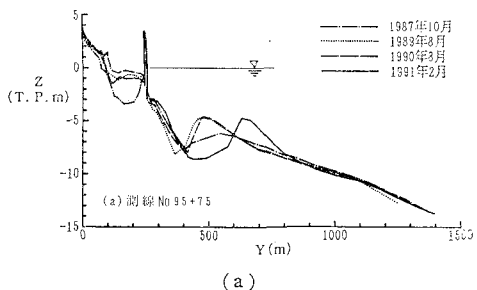
図-4 等深線図 (1991年2月)

4. 海浜断面形の比較

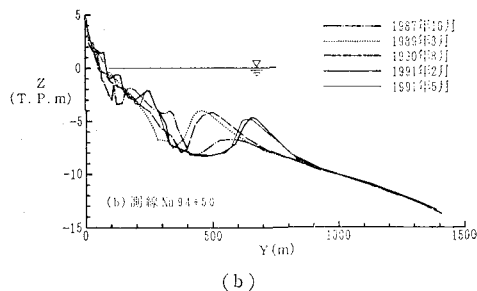
No. 92+25 (離岸堤A), No. 93+25 (人工リーフ), No. 94+50, No. 95+75 (離岸堤B) の4測線を選び、各測線に沿う海浜断面形の変化について分析する。ここにカッコ内はそれぞれの測線が横切る構造物を示す。分析に際しては、前節で述べたように沿岸漂砂の卓越方向が西向きであることを考慮して、調査区域の東側に位置する測線より断面形の比較を行う。

離岸堤Bを横切る測線 No. 95+75 の海浜断面形の変化を図-5(a)に示す。1987年には $Y \approx 500$ m 付近にピークを持ち比高約 2.0 m のバーがあったが、1989年までにこのバーは比高約 4 m へと大きく発達した。発達したバーは1990年8月までは原位置を保っていたが、その後高波浪の来襲により沖向きに移動し、 $Y \approx 650$ m に頂をもつ新しいバーが形成された。これらのバーの変動はあるが、約4年間の断面変化で見ると、沖合の -9 m 以深の断面形は重なりを示している。このことは、当海岸における波による地形変化の限界水深はほぼ 9 m にあることを示す。この断面は離岸堤を横切るが、離岸堤の沖側斜面は約 1/20 勾配で、そこでの海底面の変動は少ない。また、バーの沖への移動時、この斜面は削られることなく、逆に堆砂が生じた。さらに、離岸堤の岸側では1987年10月以降大幅な堆砂が起り、その後は安定状態にある。次に、離岸堤Bと人工リーフの開口部を通る測線 No. 94+50 の断面形を図-5(b)に示す。ここは図-5(a)に示した断面より 125 m 西側に位置する。図-5(a)の場合と同様、1987年には $Y \approx 500$ m 付近に比高 1.5 m の低いバーがあったが、1989年までに比高 4 m の大きなバーへと発達した。バーはその後1990年8月まではほぼ安定状態にあったが、1991年2月までに大きく沖

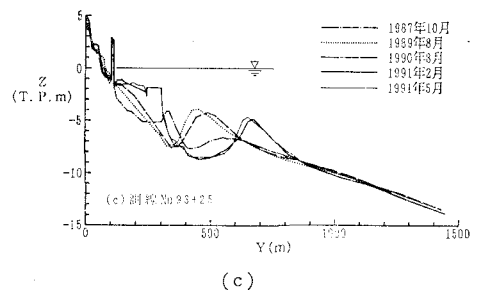
方向へと移動した。そして3カ月後の1991年5月にはバーの沖側斜面が削られ、岸側斜面で堆積する状況が見られる。この断面は構造物を横切らない測線であるが、ここでは大規模なバーの移動が見られた時、水深 3~6 m の範囲では土砂が堆積し、しかも汀線付近での地形変化は非常に小さかったことが特徴としてあげられる。図-5(c)には人工リーフを横切る測線 No. 93+25の断面変化を示す。1990年9月までに人工リーフが造られると、人工リーフの岸側には土砂が堆積し、次第に平坦な海底となった。沖合での海底変動は、バーの沖方向への移動



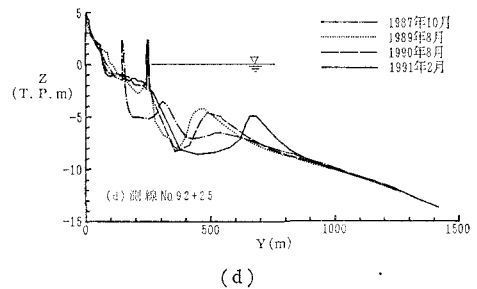
(a)



(b)



(c)



(d)

図-5 断面図

が見られたこと、また地形変化の限界水深が約9mにあることなど図-5(a), (b)の場合とよい一致を示す。最後に離岸堤Aを横切る測線 No. 92+25の断面形が図-5(d)である。この断面の変化は、同じく離岸堤を横切る測線の断面変化を示した図-5(a)の場合とほぼ同様である。この断面でもバーの沖方向への大規模な移動が起こったとき、離岸堤の沖側斜面には土砂が堆積したことが注目される。なぜならば、このような地形変化は離岸堤の安定性を高める方向の地形変化であるからである。

5. 岸沖漂砂による海浜地形変化

前節までの議論によって明らかになったように、沖合のバーはほぼ2次元的な変形を遂げた。そこで、バーの著しい変動の見られた1990年8月から1991年2月の間におけるバー頂までの沖向き距離と、侵食・堆積域の沿岸分布をまとめ、図-6に示す。ここに、離岸堤と人工リーフを横切る測線では構造物沖側までを、それ以外では汀線までを地形変化の分析範囲とする。また図-7には、バーの比高、バー頂水深および地形変化の限界水深の沿岸分布を示す。1990年8月には $Y \approx 500$ m に頂を持ったバー（バー頂水深5m）が、1991年2月には約150m沖へ移動したが、こうした移動があったにもかかわらずバー頂水深は約5mと変化がなかった。また、図-6によると、離岸堤や人工リーフの沖側付近ではいずれも堆砂が生じたことがわかる。さらに、図-7によると、地形変化の限界水深はほぼ9mであって沿岸方向に一定であったこと、またバーの比高は約3.5mより約3.8mへとわずかながら増大したことがわかる。このようにバーが沖方向へ移動したことにより、バーの形成に係わる高波浪の碎波点も約150m沖方向へ移動したと考えられる。各測線の断面図から沖合の海底勾配を求めると約1/120であることより、碎波水深 h_b は約1.25m、碎波波高 H_b は約1m増加したことになる。

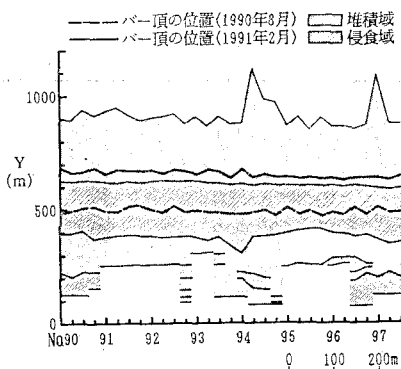


図-6 1990年8月と1991年2月におけるバー頂の位置と堆積域・侵食域

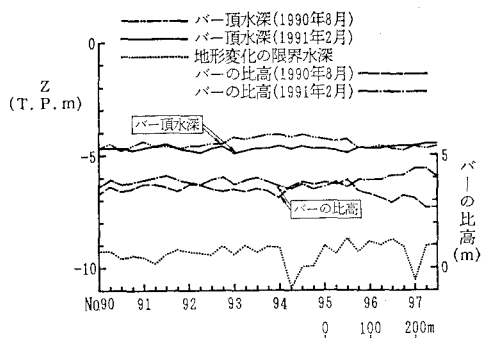


図-7 地形変化の限界水深、バー頂の水深およびバーの比高

次に、地形変化前後での土砂収支を調べるために、各測線毎の断面積変化を図-8に示す。 A_1 と A_3 は堆積面積（ A_1 が岸側）、 A_2 は侵食面積である。図-8によると、全測線とも A_2 が最大で、この部分の底質が沖側（ A_3 ）、岸側（ A_1 ）にふり分けられたこと、また沖側への底質移動量は岸側へのそれに比較して約4倍も大きいことがわかる。また、 A_1+A_3 と A_2 を比較すると、いずれの断面でもNo. 90+25～No. 91+75以外では断面積変化量はほぼ負であり、土砂収支が成立しないことがわかる。全範囲での土砂の減少量を計算すると約6万 m^3 となる。構造物の岸側への堆積土砂量は除外したものの、これらは無視できる大きさである。したがって土砂が調査範囲から流出したことは間違いないが、各測線の断面図において沖合の約-9mで地形変化が収束していることから、沖への土砂移動は考えられない。したがってこのような土砂量の欠損の直接的原因は沿岸漂砂の不均衡によると考えられる。

バーの大規模な移動が見られた1990年8月より1991年2月のうち、特に高波浪が来襲したと考えられる冬期風浪時の1990年12月1日から1991年2月28日の間における、金沢港での日最大有義波高と周期の経時変化を図-9に示す。図示した期間では12月27日に $H_{1/3} = 7.82$ m、

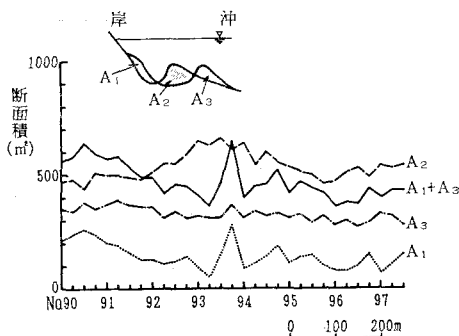


図-8 侵食・堆積断面積変化量の沿岸分布

$T_{1/3}=14.1\text{ s}$ という高波浪が発生している。これに対し表-1によると、1987年から1989年までの3年間での有義波高の最大値は、1987年3月に金沢港で観測された $H_{1/3}=6.87\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=11.0\text{ s}$ である。そこで各々のケースにおいて換算沖波波高 H_0' を求めて波形勾配を計算すると、前者で $H_0'/L_0=0.025$ 、後者で $H_0'/L_0=0.039$ となる。これらをもとに h_b/H_0' を求めると、前者で 1.59、後者で 1.51 となることから、 h_b は各々 12.4 m、11.0 m となる。これらの水深はバー位置の水深と比較すると共に大きな値であり、これらの波がそのままバーの形成にあずかったとは考えにくい。しかし、1 ストーム時における地形変化はこれらの波高より低く、頻度の高い入射波により定まると考えたとしても、上述の碎波水深の差 (1.4 m) は実測の碎波水深の差の傾向を示していると思われる。このことから前述の碎波点の沖への移動が説明される。ゆえにバーの大規模な移動はほぼ1990年12月27日の高波浪により発生したと判断できよう。

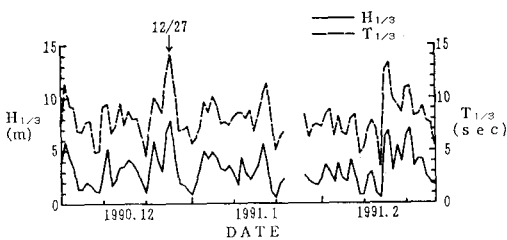


図-9 金沢港における日最大有義波高の変化 (1990年12月1日～1991年2月28日)

以上に述べた地形変化においては、バーが削られ、その土砂が岸側、沖側へ移動した。このようなタイプの地形変化は堀川ほか (1975) の地形変化分類によればタイプIIとなり、次式の係数 C が $9 \leq C \leq 18$ の場合成立している。

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

ここに、 H_0 は沖波波高、 $\tan \beta$ は海底勾配である。そこで式 (1) に $H_0'=7.82\text{ m}$ ($H_{1/3}=7.82\text{ m}$ に対応)、 $T=$

14.1 s 、 $\tan \beta=1/120$ 、 $d_{50}=0.14\text{ mm}$ (沖合部の底質調査による) を代入すると、 $C=122$ となる。この値は、汀線付近が削られて沖に土砂が堆積するタイプ1の地形変化に相当する。このように、本研究で得られた実測の地形変化パターンは、それが2次元の地形変化であったにもかかわらず、堀川ほかの与えた地形変化パターンでは十分説明し切れない現象であった。

6. 結 論

本研究の成果は以下に要約される。

①石川海岸において高波浪の来襲に伴い、バーの沖方向への移動が観測された。バーの移動は非常に2次元であり、高波浪の来襲前のバーが削られて沖合にバーが形成されるとともに、離岸堤や人工リーフと古いバーの間では土砂が堆積することが分かった。

②石川海岸では離岸堤および人工リーフの建設に伴い、これらの構造物の岸側には堆砂が見られた。そして沖合部では①で述べた大規模な海浜地形変動があるにもかかわらず、これらの構造物周辺 (岸側、沖側含む) の地形は安定していることが分かった。

③離岸堤の建設に伴い、離岸堤部ではバー・トラフが沖へと移動し、全体に沖合の等深線の形が波状となる特性が見い出された。そしてこれは沿岸流の蛇行によるものと推定された。

参 考 文 献

- 石田 啓・高瀬信忠・長原久克・浦 良一(1984): 渚ドライブウェーを有する千里浜海岸の現況と侵食対策, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 355-359.
- 宇多高明・坂野 章・竹淵 勉(1989): 人工リーフの消波効果と構造物周りの海浜変形に関する実験的検討, 土木技術資料, Vol. 31, No. 5, pp. 268-273.
- 小舟浩治・亀山 豊・末次広児・菅原一晃・後藤智明・橋本典明(1989): 沿岸波浪観測年報(1987), 港湾技研資料, No. 642.
- 小舟浩治・亀山 豊・菅原一晃・橋本典明(1990): 沿岸波浪観測年報(1988), 港湾技研資料, No. 666.
- 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. 329-333.