

新しい海浜安定化手法の提案とその効果に関する実験的検討

田中茂信*・山本幸次**・林 正男**

1. まえがき

近年、全国各地で海岸侵食が問題となっている。例えば、田中ほか（1993）は、新旧の地形図の比較により海岸線の変化状況を調査し、明治以降においては自然に堆積する海岸より侵食される方の面積・延長が大きいこと、および侵食の速度が加速傾向にあることを示した。

また、宇多（1990）は海岸侵食の全国実態を調べ、沿岸漂砂の阻止、防波堤の遮蔽域における循環流の形成、河川や海崖からの供給土砂量の減少、海浜からの砂利採取などが侵食の主な原因であると指摘した。さらに、一般的には沿岸漂砂の阻止と、河川や海崖からの供給土砂量の減少が侵食の原因となった海岸が多いとしている。

このような海岸侵食の対策は、護岸や突堤、離岸堤などの施工により行われてきた。しかし、この種の海岸保全構造物による対策が進めば海岸線が消波ブロックに覆われてしまい、良好な自然環境である砂浜を次世代に残せないことになる。

そこで、本研究では自然の砂浜をありのままに近い姿で残せる新しい海浜安定化手法を提案するとともに、その実用性について実験的に検討した。

2. 侵食機構および従来の海岸保全手法の問題点

ここでは、図-1に示すような岬と岬に囲まれ、斜めから入射する波により沿岸漂砂が卓越する海岸を考える。土砂は沿岸漂砂によって←印で示した方向に運ばれ、岬に沿って深海へと流出する。図-1(a)では河川からの供給土砂と沿岸漂砂量、深海への流出土砂とは均衡し、海岸は安定状態にあるとする。

ここで、河川からの供給土砂が減少すると沿岸漂砂量は変わらないから河口周辺で侵食が生じる。また、港湾などの海岸構造物が建設されると沿岸漂砂の上手側で堆積が、下手側で侵食が生じることになる。このとき、依然として沿岸漂砂末端の岬から深海へと土砂の流出があるから、構造物周辺の堆積量よりも侵食量の方が大きく

なる。また、港湾などの構造物に沿う沖向きの流れが生じるから、図-1(a)で無視した沖向き漂砂が多くなる。このような機構により、河川改修やダムの建設、港湾などの海岸構造物の建設が進んだ近年では、海岸侵食が一層著しくなったと考えられる。

図-1(b)の侵食対策として護岸や離岸堤など（△印）を施工した場合を模式的に示したのが図-2である。図-2においては、施工された護岸や離岸堤などが沿岸漂砂の沿岸方向分布を歪ませることになり、その下手側が侵食され、その対策として護岸や離岸堤をさらに施工することを繰り返すから、結果的に海岸線全体を護岸や離岸堤などで覆わなければならない。

その結果、消波ブロックに覆われた海岸となり、良好な砂浜海岸は失われ環境は悪化する。しかも、護岸や離岸堤などの沖側の侵食が進み、海底は深くなる。結局、

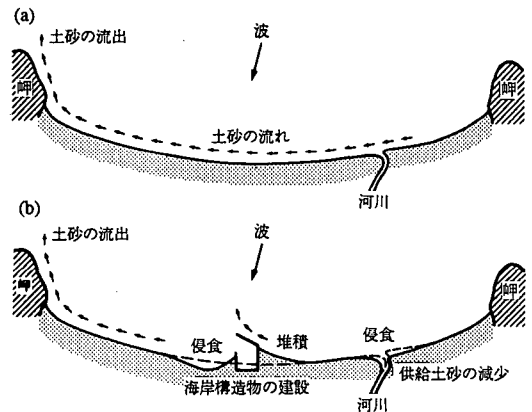


図-1 モデル海浜における土砂移動と侵食

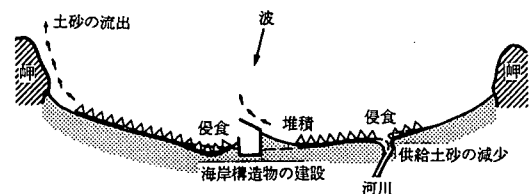


図-2 護岸・離岸堤による海岸保全の模式図

* 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室長
 ** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室研究員

護岸や離岸堤などの安定性が失われ沈下や倒壊が生じ、海岸保全上再び改修しなければならない。

したがって、この海岸保全手法には環境の悪化の問題と、経済的な問題がある。さらに、河川からの供給土砂の減少、港湾周辺の沖向き漂砂の増大、深海への土砂流出に対する対策がとられていないために、漂砂系の土砂量の保全から考えると根本的な問題解決になっていない。

3. 新しい海浜安定化手法の提案

海岸侵食の根本原因の一つである深海への土砂流出と構造物周辺の沖向き漂砂に対処し、海岸に構造物を施工することのない海浜安定化手法として図-3に示す手法が提案できる。この手法は深海へ流出する土砂と、構造物周辺から沖へ流出する土砂を採取し、沿岸漂砂の上手側へと運搬・投入する手法である。すなわち、漂砂系から失われていた土砂を有効利用しようとする手法であり、このことからサンドリサイクルシステムと称する。

サンドリサイクルシステムは土砂循環系統、システム制御系統、波力発電系統からなる。このシステムの利点としては、従来の養浜工法で問題であった土砂の確保が容易なこと、海岸に構造物を設置しないので環境面に問題がないこと、各系統は部分的に構築が可能で、システムが完成すればメンテナンスが容易なことなどが挙げられる。また、このシステムは侵食の著しく生じる高波浪時に稼動するように設定できるので、土砂投入による海水の濁りの問題は小さいと考えられる。

養浜工法やサンドパイパスとの違いとしては、土砂の移動の著しい高波浪時において侵食が生じる可能性の高い場所に土砂を供給する点にある。また、土砂をスラリー輸送することにより、養浜などで問題であったトラック輸送の際の経費の増大、環境悪化に関しても解消を図ることができる。

しかし、このシステムを実用的な海浜安定化手法とするためには、土砂の採取方法、投入方法、輸送方法、システムの稼動条件、波力発電の効率などの開発・解決すべき課題がいくつかある。そこで本研究では、そのなかの一つである土砂移動の著しい高波浪時に侵食域に土砂

をスラリーとして連続投入することが、海岸侵食対策となりうるか否かについて実験を行い、サンドリサイクルシステムの有効性を検討した。

4. 実験方法

実験は図-4に示す平面水槽(幅 30 m, 長さ 23 m, 高さ 1 m)内の中央約 16.4 m の範囲で行った。この範囲に水槽底面からの高さ 40 cm, 天端幅 1.0 m, 勾配 1/10 の断面形で沿岸方向に一樣な模型海浜を中央粒径 $d_{50} = 0.22$ mm の粒度調整砂により整形した。この模型海浜(16.4 m)に対して造波機を 12° 傾け、図中右向きの沿岸漂砂が卓越する条件とし、さらに先端水深 30 cm の突堤を 12 m 間隔で 2 基設置し沿岸漂砂の系が閉じるようにした。座標軸は左側の突堤と 1/10 勾配海浜の汀線との交点を原点として、沿岸方向を X 軸、沖方向を Y 軸とし、Z 軸は鉛直上方を正とした。

波浪条件は入射波高 $H_0 = 5.0$ cm, 周期 $T = 1.13$ s, 波形勾配 $H_0/L_0 = 0.025$ とした。この波浪条件と実験砂との関係から佐藤・田中による表層移動限界水深(例えば、堀川(1973))は約 17 cm となる。したがって、表層移動限界水深は水槽底面水深 $Z = -30$ cm より十分浅いため、実験における海浜変形には水槽底面の影響は生じない条件となる。

実験の目的は、波の作用下で水と混合した土砂をスラリーとして連続投入し安定な海浜を形成させることにあ

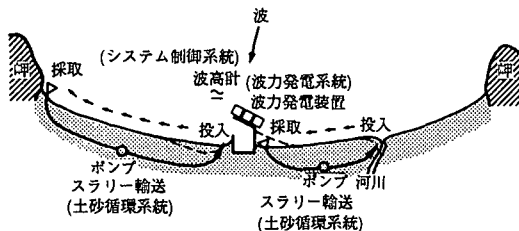


図-3 サンドリサイクルシステムによる海岸保全の模式図

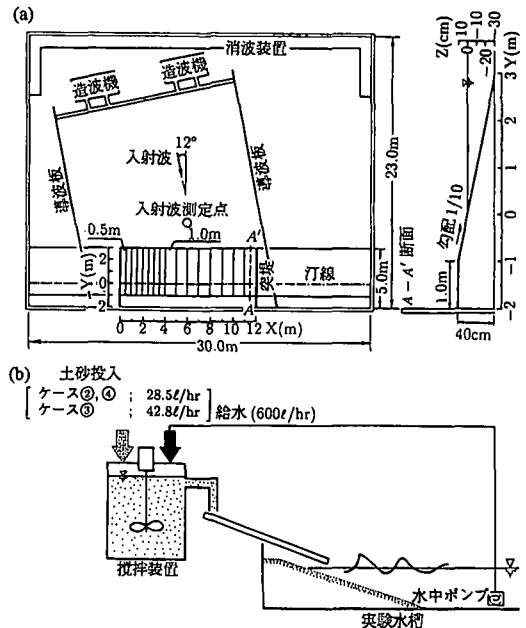


図-4 実験水槽と模型海浜の諸元、土砂の連続投入手法の模式図

り、土砂の投入量と岸沖方向の投入位置が重要となる。そこで、図-4(b)に示す装置により実験砂と水を混合し、スラリーとして連続投入することにした。実験では土砂を下手側から採取しない条件としたが、これは高波浪の作用するもとの土砂の連続投入による侵食防止効果のみに着目したためである。

ところで、実験室において一様勾配の模型海浜に波を作用させると実験室固有の岸沖変形が生じる。そこで、整形した一様勾配の模型海浜に波を1時間作用させた海浜地形を初期地形とした。また、実験では $X=6\text{ m}$ 、 $Y=5\text{ m}$ の位置で入射波を、突堤間の17測線で碎波波高、海浜地形を測定した(図-4参照)。さらに、フロートの動きをビデオで記録、解析し、平面的な流速分布を求めた。

5. 実験結果

(1) 地形変化と沿岸漂砂の特性

まず、設定した実験条件下での地形変化と沿岸漂砂の特性について検討した(ケース①)。

初期地形に波を作用させると、波は模型海浜上を屈折して進行し、 Y 軸に対し約 6° の角度で碎波した。碎波点は汀線から約40 cm 沖側にあり、沿岸方向にほぼ同じ幅の碎波帯を形成し、碎波波高も5.7~7.0 cmの値でほぼ一様となる。この碎波条件のもとでの流況は、幅約40 cmの碎波帯内では $X=0\sim 1.5\text{ m}$ における流れは弱く、 $X=1.5\text{ m}$ 付近から6~15 cm/sの強い右向きの沿岸流が生じ、 $X=12\text{ m}$ 付近で沖へと流出した。また、碎波帯外では5 cm/s以下の弱い岸向き流れとなった。

以上の碎波条件、流況のもとでの汀線変化(図-5(a))によると、 $X=0\sim 7.0\text{ m}$ で経時的に汀線が後退し、その量が多いのは $X=2.0\sim 4.0\text{ m}$ であり、 $X=7.0\sim 12.0\text{ m}$ で汀線が前進した。また、侵食面積に比較して堆積面

積が小さいことも読み取れる。

この汀線変化から侵食域、中立域、堆積域に位置する代表測線を選び、その海浜断面形を図-5(b)に示す。初期の断面形は $X=2.5\text{ m}$ 、 $X=7.0\text{ m}$ 、 $X=12.0\text{ m}$ の3測線とも汀線付近に頂高 $Z=5\text{ cm}$ ($Y=-0.25\text{ m}$) のバームが形成されている。 $X=2.5\text{ m}$ の測線ではこのバームから $Z=-5\text{ cm}$ の範囲が経時的に侵食された。 $X=7.0\text{ m}$ の測線では断面形状はほとんど変化していない。これは、 $X=7.0\text{ m}$ の測線は海浜のほぼ中央に位置するため両突堤の影響を受けず、沿岸漂砂の収支の均衡がとれ地形変化はほとんど生じないことによる。

$X=12.0\text{ m}$ の測線では陸上部のバームがさらに発達したが、波作用後1時間以降ではバームの発達は顕著でない。また、 $Z=-10\sim -15\text{ cm}$ では経時的に砂が堆積している。このことから、 $X=12.0\text{ m}$ の測線は右側突堤の近傍に位置するため、右向きの沿岸漂砂によって運ばれた土砂が堆積するが、波作用後1時間でほぼ安定状態に達し、さらに運ばれた土砂は突堤に沿う沖向き流れによって $Z=-10\sim -15\text{ cm}$ に経時的に堆積したと考えられる。

ケース①の土砂量変化を図-6に示す。初期地形に4時間波を作用させると、沿岸方向全域の $Y=1.0\sim 1.7\text{ m}$ 付近(網かけ部分)で1 cm以上の堆積が見られるが、これは岸沖漂砂によるものと考えられる。岸側($Y<1\text{ m}$)では侵食の生じている範囲(斜線部分)は $X=0\sim 7.0\text{ m}$ 、堆積の生じている範囲(網かけ部分)は $X=7.0\sim 12.0\text{ m}$ であり、侵食域の方が沿岸方向への広がりやや大きい。また、右側突堤近傍では沖合の $Y=1.0\sim 1.7\text{ m}$ 付近の堆積量が大きくなっている。

汀線変化、地形変化から $X=7.0\text{ m}$ を境として侵食域と堆積域に分け、それらの総土砂変化量(V_e , V_a)を算出すると $V_e=-111.9\times 10^{-3}\text{ m}^3$ 、 $V_a=101.7\times 10^{-3}\text{ m}^3$ であり、その収支は $-10.2\times 10^{-3}\text{ m}^3$ となる。 V_e と V_a の絶対値の平均値 T_v は $106.8\times 10^{-3}\text{ m}^3$ で、侵食量と堆積量の誤差 E_v は $10.2\times 10^{-3}\text{ m}^3$ と、 E_v は T_v の1割以下であ

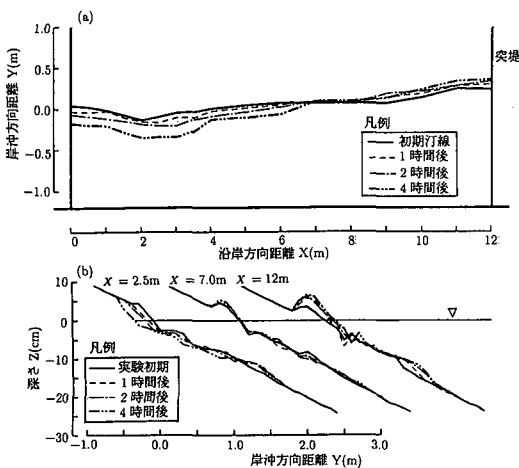


図-5 汀線と断面形の経時変化

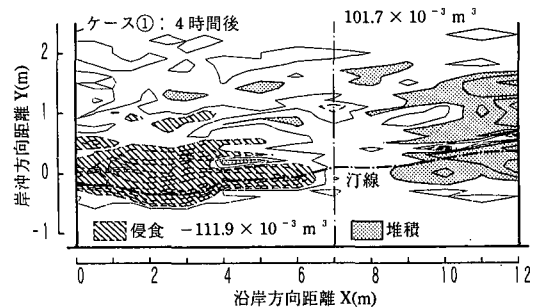


図-6 4時間後の地形変化量(ケース①)

り、移動床模型実験における全沿岸漂砂量を算出するにあたって十分な地形測定の精度(宇多ほか(1987))を有する。そこで、土砂量の算出結果をもとに沿岸漂砂量の沿岸方向分布を求めると図-7となる。分布形は各時間ともほぼ一様で、沿岸漂砂量のピークの値も $25.8 \sim 28.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ の範囲におさまる。このことから、実験中の沿岸漂砂量は時間的にほぼ一定であると仮定でき、ケース①の代表沿岸漂砂量を最大値の $28.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ とする。

(2) サンドリサイクルシステムの侵食防止効果

ケース①の実験結果を踏まえ、サンドリサイクルシステムの効果に関する実験(ケース②~④)における投入土砂量と投入位置を選定した(表-1)。まず、ケース②ではケース①の沿岸漂砂量と同量の土砂量を砕波帯内に投入した。投入量は $28.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ である。投入位置については、汀線から砕波点までの距離が約40 cmであったこと、及び沿岸流が $X=1.5 \text{ m}$ 付近から発達し、汀線の後退が $X=2 \text{ m}$ 付近で著しいことから $X=1.75 \text{ m}$ 、 $Y=0.25 \text{ m}$ とした(図-5参照)。ケース③では土砂の投入位置をケース②と同じにして、投入量を1.5倍の $42.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ とした。ケース④では土砂の投入量と沿岸方向の投入位置をケース②と同じにし、岸沖方向の投入位置を波の打ち上がる位置($Y=-0.25 \text{ m}$ 、図-5参照)とした。

実験においては計量カップで砂を計り図-4に示す装置で供給した。この場合、実験の都合上、砂の投入体積

のみを制御することとし、実際に投入した正確な土砂量は以下のように求めた。すなわち、ケース②~④の地形測量の結果から土砂量を算出し、侵食量と堆積量の収支から投入した土砂量を推定することにした。表-1に()書きとしてその値を示すが、ケース②では $29.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ とやや多くなり、ケース③、④では $38.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ 、 $27.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ と少なくなった。特に、ケース③ではケース①の沿岸漂砂量の1.5倍に設定したが、実際には約1.3倍の投入量となった。以下では、この地形測量の結果から推定される投入土砂量で議論を進めるものとする。

ケース②~④の汀線の経時変化を図-8に示す。なお、土砂の投入位置は▼印で示した。実験では土砂を投入することで、その下手側の侵食を防止できるかどうかに着目している。そこで、ケース②~④のいずれの場合も汀線が後退傾向にある $X=4.0 \sim 7.0 \text{ m}$ の範囲はあえて無視し、ケース①で侵食の著しい $X=2.0 \sim 4.0 \text{ m}$ の範囲(図-5(a)参照)の比較により各ケースの侵食防止効果を検討する。

砕波帯内に自然海浜の沿岸漂砂量とほぼ同量の土砂を投入した場合のケース②では、 $X=2.0 \sim 4.0 \text{ m}$ の汀線は後退しており侵食防止効果はあまり高くないと言える。ケース②と同じ位置に約1.3倍の土砂量 $38.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ を投入したケース③(図-8(b))では、 $X=2.0 \sim 4.0 \text{ m}$ では汀線変化はほとんど見られず、砕波帯内に土砂を投入する場合、自然海浜の沿岸漂砂量の1.3倍程度の土砂量を投入すればかなりの侵食防止効果があることが分かる。ケース②とほぼ同じ土砂量を波打ち帯(汀線から波の打ち上げ高さの間)に投入したケース④(図-8(c))

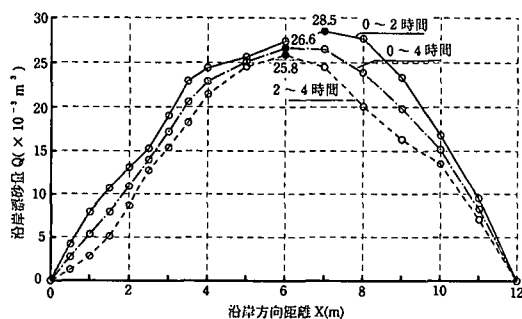


図-7 沿岸漂砂量の分布形(ケース①)

表-1 実験ケースと土砂投入条件

ケース	波浪条件	投入土砂量	土砂投入位置
①		0	
②	$H_b=5.0 \text{ cm}$ $T=1.13 \text{ sec}$ 入射角度 12°	28.5 l/hr (29.5 l/hr)	波浪帯内 $X=1.75 \text{ m}$ $Y=+0.25 \text{ m}$
③		42.8 l/hr (38.6 l/hr)	
④		28.5 l/hr (27.1 l/hr)	波打帯 $X=1.75 \text{ m}$ $Y=-0.25 \text{ m}$

() 書きは、土砂収支より得られた投入土砂量

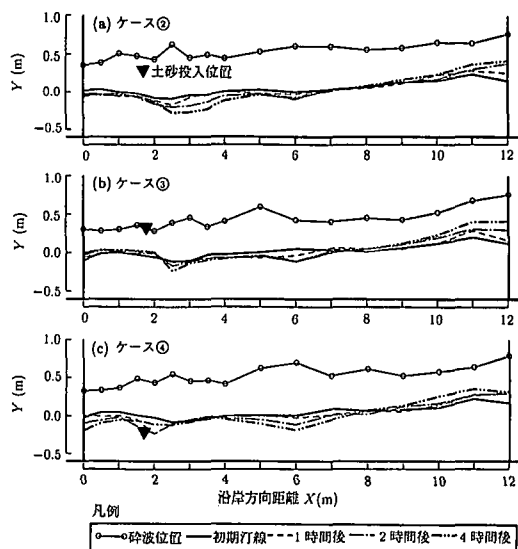


図-8 各ケースの汀線経時変化

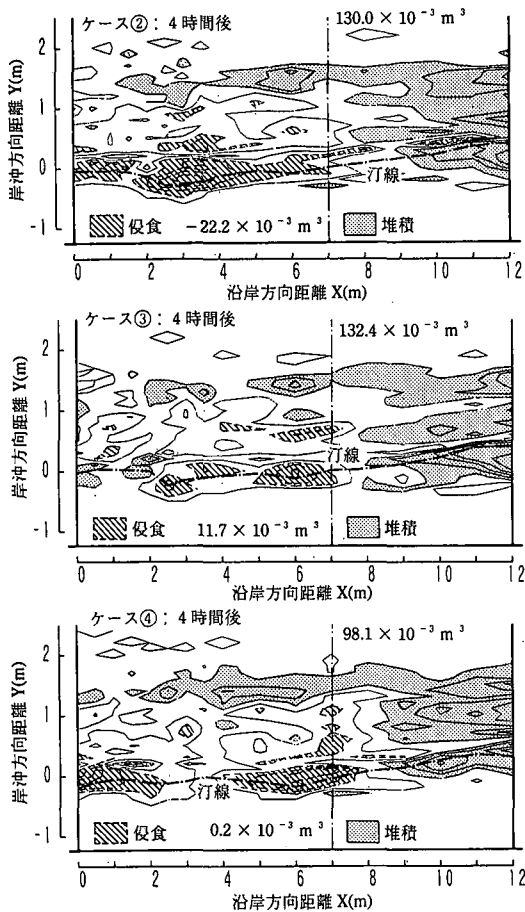


図-9 各ケースの4時間後の地形変化量

では、 $X=2.0\sim 4.0$ mの範囲の汀線はほとんど変化せず、ケース②より侵食防止効果はかなり高い。したがって、自然海浜の沿岸漂砂量とほぼ同量の土砂投入を行う場合、波打ち帯に投入すれば侵食を防止できると言える。

次に、汀線変化のみで侵食防止効果を評価することはできないので、土砂量変化をもとに検討する(図-9)。ケース②ではケース①(図-6参照)と比較すると、侵食域では沖側で広く堆積が見られ、岸側の侵食量が小さくなり、堆積域では堆積量が多くなった。 $X=0\sim 7.0$ mの侵食領域(破線左側)の変動土砂量は $-22.2\times 10^{-3}\text{ m}^3$ で、 $X=7.0$ mより下手側(破線右側)のそれは $130.0\times 10^{-3}\text{ m}^3$ である。侵食域の変動土砂量がケース①の $-111.9\times 10^{-3}\text{ m}^3$ から $-22.2\times 10^{-3}\text{ m}^3$ に減ったことは、沿岸漂砂量の大部分が投入土砂量で賄え、大きな地形変化が生じなかったと考えられる。したがって、土砂量変化の面から

はケース②でも侵食防止効果が期待できる。

ケース③の侵食域ではケース①、②に比較して明らかに侵食量が減少し、沖側の堆積量もケース②に比較すると小さい。堆積域ではケース②とほぼ同じ堆積傾向となった。 $X=7.0$ m(破線)を境とした侵食域の変動土砂量は $11.7\times 10^{-3}\text{ m}^3$ と堆積したことを示し、堆積域のそれは $132.4\times 10^{-3}\text{ m}^3$ とケース②とほぼ同じ量である。したがって、土砂量変化から見るとケース③の場合はかなりの効果があることが分かる。

ケース④では侵食域の沖側の堆積状況はケース②とほぼ同じであり、岸側では侵食される場所が2つに別れている。これは、波打ち帯に土砂を投入したため、投入地点が砂突堤状となり沿岸漂砂に影響を与えたためと考えられる。 $X=7.0$ m(破線)を境とした侵食域では土砂の変動量は $0.2\times 10^{-3}\text{ m}^3$ 、堆積域では $98.1\times 10^{-3}\text{ m}^3$ となり、侵食が少なくなったことから、地形変化量から見てもケース④の場合は土砂投入量の多いケース③に比較して、効率的な侵食防止効果があることが分かる。

6. あとがき

新しい海浜安定化手法として、漂砂系から流出する土砂を漂砂上手側に投入し循環させるサンドリサイクルシステムを提案し、その侵食防止効果を移動床模型実験により確認した。それによれば、沿岸漂砂量とほぼ同じ土砂量を投入する場合は、碎波帯内よりも波打ち帯に投入すればよく、碎波帯内に投入する場合は、沿岸漂砂量の1.3倍程度の土砂量が必要なことを明らかにした。

なお、今回の実験条件は限られたものであり、これを現地にそのまま適用することはできない。その意味からも、今後、土砂の採取手法、土砂投入量、投入位置、運搬手法などについて室内および現地における実験、現地調査により検討する必要がある。

参考文献

- 宇多高明(1990): わが国の海岸侵食の現状とその問題点, 地理, Vol. 35, No. 6, pp. 34-43.
- 宇多高明・小俣 篤・山本幸次(1987): 海岸移動床平面実験における地形測定の精度の検討, 第31回水理講演会論文集, pp. 749-754.
- 砂村継夫(1985): 第2編第2章 海浜地形, 堀川清司編「海岸環境工学」, 東京大学出版会, pp. 130-146.
- 田中茂信・小荒井 篤・深沢 満(1993): 地形図の比較による全国の海岸線変化, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 416-420.
- 土屋義人(1984): 海岸侵食制御試験, 海岸, No. 24, pp. 100-109.
- 堀川清司(1973): 「海岸工学」, 東京大学出版会, 208 p.