

天橋立海岸におけるサンドバイパス工法による 動的安定海浜の形成

陳 活 雄*・山 田 稔**・土 屋 義 人***

1. 緒 言

天橋立海岸はわが国で最初にサンドバイパス工法が施工されたことで知られている(矢島ら, 1982; 黒田, 1985)。この海岸は、典型的な砂嘴地形海岸であって、一方向性の卓越した沿岸漂砂の堆積作用により形成されたものであって、もし上手において沿岸漂砂の遮断が起これば、漂砂の連続性からいって、下手において直ちに侵食が惹起される宿命を有している。実際、この海岸の上手に、防波堤が建設された後、直ちにこの海岸に砂浜の侵食が生じ、突堤工法による侵食対策が実施されてきたが、最近ではこれと併用して養浜・サンドバイパス工法が適用されて、美しい砂浜を形成するに至っている。そこには、図-1に示すように突堤間に砂浜が形成され、動的に安定な海浜に次第に近づきつつあるものと思われる。もしそうであれば、動的に安定な海浜として必要な沿岸漂砂量をサンドバイパスすればよく、このことはこの工法の適用における重要な規範を与えるはずである。

本研究では突堤間に形成されている砂浜形状の経年変化を養浜・サンドバイパス量の経年変化との関係で考察するとともに、安定海浜の理論形状と実際に形成されている砂浜のそれとの比較から、安定海浜への移行過程を究明して、サンドバイパス工法による動的に安定な砂浜の形成過程を明らかにし、必要なサンドバイパス量の推定を行う。

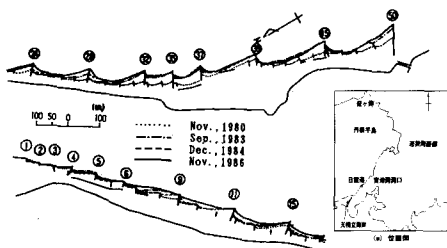


図-1 天橋立海岸における海浜の形成状況

2. 天橋立海岸におけるサンドバイパス工法の 実施経過

当海岸におけるサンドバイパス工法の採用の経緯や技術的課題については、すでに矢島ら(1982)によって紹介されている。当海岸における侵食対策は突堤、養浜およびサンドバイパス工法(一般に養浜工法の一つとされるが、ここでは砂浜を太らすことを主眼とした場合を養浜工法と呼んで一応区別する)の三つが順次採用された。現在はこれら三つの工法が複合した海岸侵食制御がはかられている。突堤工法は、大小の突堤群からなり、昭和30年頃から約25年間にわたって機能したが、その効果は芳しくなく、砂浜はやせ細ったままであった。昭和54年から60年にかけては養浜工法が併用されて、従来の汀線が平均して約20m前進し、大突堤の上手ではその先端まで漂砂の堆積が進行し、大天橋全体において、一応漂砂の連続性が確保されるようになった(京都府, 1987)。昭和60年以降はBascom(1970)のいう漂砂の“コンベアー・ベルト”が形成されたことにより、サンドバイパス工法の適応性が高まり、試験施工の後本格的に実施されて今日に至っている。これまでに実施された養浜・サンドバイパス土量は、平成2年の時点で約12万 m^3 に及ぶ。

3. 砂浜群に入射する波浪の屈折変形特性

宮津湾内における過去の波浪観測結果によれば、外海波浪(経ヶ岬)との間に対応関係が存在すること、その波浪特性、特に周期は $T_{1/3}=5\sim 12$ secと広範囲にわたり、かなりうねりがある(京都府, 1987)。このような波は、宮津湾のwave windowを通して来襲したものである。しかし、従来、wave windowの視点から、内外波浪の対応関係が明らかにされていないため、天橋立海岸に来襲する代表波浪を特定できない。ここでは、屈折特性とwave windowの視点から、天橋立海岸に入射し、海浜変形を支配する波浪条件を明らかにして、代表波浪を特定し、それによる屈折計算を行って碎波特性を求める。

(1) 空中写真による来襲波浪の波向き観測

屈折計算に用いる波向き線法の精度を検討するため

* 正会員 工修 (株)ニュージェック 水工部長

** 正会員 京都府土木建築部港湾課長

*** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

に、撮影された航空写真から読みとった波峰線と、屈折計算よりもとめた波向きとを比較して図-2に示す。計算の波向き線と観測の波峰線とは、砕波点付近において、ほぼ直交していることから、波向き線法による波向き線の推定は十分な精度で可能といえる。この場合の観測周期は約 $T=8.0$ sec であり、撮影時の経ヶ岬の周期も $T=8$ sec であることから、若狭湾沖における波向き $N 48^{\circ}E$ の波が来襲していたことがわかった。この波向きは宮津湾の wave window ($N 45^{\circ}E$ から $N 55^{\circ}E$) 内のものであり、波は直接侵入したことがわかる。

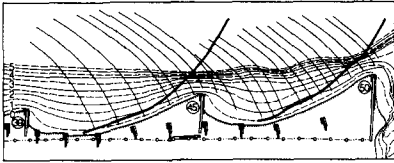


図-2 観測の波峰線と計算の波向き線

(2) 波浪の変形計算

若狭湾沖の波浪条件は、波向きを N から $N 48^{\circ}E$ までが対象となる。周期は、宮津湾の wave window に周辺の地形特性を加味して、 N から $N 48^{\circ}E$ までは冬春季節風の通過に伴う周期 10 sec から 12 sec の比較的長い寄廻り波を、また $N 35^{\circ}E$ から $N 48^{\circ}E$ までは松任海岸沖で発生する波を考慮して、周期 6 sec から 8 sec の風波を与えて屈折計算を行った。これらの屈折計算結果から、次のことが考察される。若狭湾沖で波向きが N から $N 15^{\circ}E$ までの波浪は、丹後半島に遮られて宮津湾には直接侵入しないと考えるとよく、また $N 15^{\circ}E$ から $N 35^{\circ}E$ および $N 35^{\circ}E$ から $N 40^{\circ}E$ までの波浪は、屈折しながら宮津湾に侵入するが、天橋立海岸沖での波高は屈折により著しく小さくなる。 $N 40^{\circ}E$ から $N 45^{\circ}E$ までの波浪も、屈折して侵入し、波高は $1/40$ 程度である。 $N 45^{\circ}E$ から $N 48^{\circ}E$ までの波浪は、宮津湾の wave window 内のもので、直接侵入してその波高は $1/10$ 程度になり、さらに $N 40^{\circ}E$ から $N 48^{\circ}E$ までの条件において天橋立海岸沖での波向きはほとんど変わらないことが分かった。

当海岸の砂浜海浜の形成に影響を及ぼす波浪条件は、計算結果より、比較的屈折による波高減少のない宮津湾の wave window の範囲内から侵入する若狭湾沖での波向き $N 48^{\circ}E$ の波浪と考えられる。この場合、周期 8 sec の波は、天橋立海岸沖 (水深 20 m) での波高が小さすぎるように思われるので、実際に安定海浜の形成に影響を及ぼすのは、宮津湾内でもさらに発達して波高を増大させる波浪であろう。このように考えて、波向き $N 48^{\circ}E$ で、天橋立海岸沖 (水深 20 m) における波高を $H_0=100$ cm として屈折計算を行い、下手側ヘッドランド (突堤)

の砂浜に対する砕波角および砕波水深を求め、これらの空間的平均値を用いた。

4. 砂浜形状の経年変化と形状特性

突堤が自然のヘッドランドの役目を果たし、これが突堤間の砂浜の変形を規制して安定海浜が形成されるという立場から、安定海浜の分類に用いた図-3に示す海浜形状の表示 (土屋, 1991) で、砂浜形状の経年変化を養浜・サンドバイパス量の経年変化との関係で明らかにし、その安定海浜としての形状特性を明らかにする。突堤間における砂浜群の形成は、養浜・サンドバイパス量の経年変化と不可分の関係にある。また、砂浜形状の経年変化とも密接に関係している。

図-4および5には、砂浜ごとの汀線変化量および堆積土砂量の経年変化を示す。汀線変化量は最大湾入率 (y_{max}/L) とその位置の変化を表わすが、昭和 61 年以降はいずれも変動はわずかで定常に近づく傾向を示す。昭和 55 年~56 年頃の海浜地形による初期状態からの変動量で表わした堆積土砂量も若干変動するが、ほぼ同様の傾

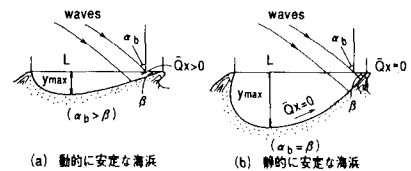


図-3 海浜形状の表示

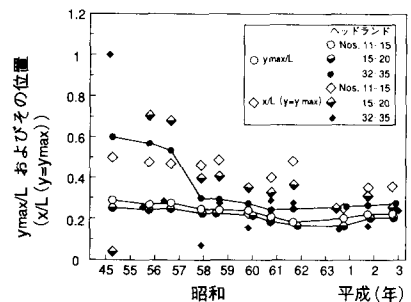


図-4 最大湾入率およびその位置の経年変化

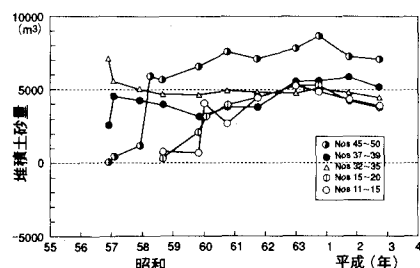


図-5 堆積土砂量の経年変化

向が見い出される。しかし、昭和61年以前では、積極的に養浜がなされたので、その影響が直接にあらわれて変動も大きい。ただし、測量は沿岸方向に10~20mの断面ピッチをとり、水深4.0m以浅を全てレベルスタッフ法により行なった。養浜砂量と堆積砂量との関係をさらに考察するために、両者の比をとって、経年的変化として表わすと図-6のようになる。直接養浜した土砂量に比べて堆積量が少ない場合(比値が1以下)と大きい場合があり、またいずれの場合も昭和61年以降多少の変動はあるが、定常に近づく傾向を示す。前者の例は、星印で示す最上手のヘッドランドNo.4からNo.5の場合で、養浜砂のほとんど全てが、下手に沿岸漂砂として輸送される。すなわち、定常状態はいわば満腹状態に相当し、このような砂浜に過剰養浜を行うと、下手の漂砂量を増大させる可能性がある。この比が1より大きい場合は上手からの漂砂が捕捉されていることを意味し、直接の養浜砂量が少なくても自然の力とヘッドランドの機能を利用して、上手の沿岸漂砂をトラップして砂浜を太らせている。これは、ヘッドランドNo.15からNo.20において明らかである。 y_{max}/L と堆積砂量との間には、養浜砂量の経年変化との関連において、図-7のような関係が存在する。図は海浜群全体のヘッドランド間における三者それぞれの経年変化を示し、代表に選んだヘッドランド間においては、三者全部の変化を表わし、その他のヘッドランド間では養浜砂量のみを経年変化を、投入年を示す数字を付して表示し、上手の養浜が下手の選定したヘッドランド間における y_{max}/L および堆積砂量に及ぼす変化を見たものである。沿岸漂砂の上手地点における養浜

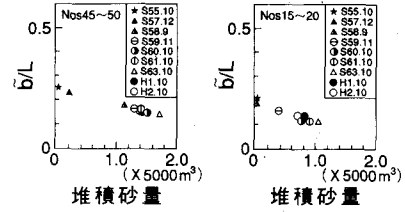


図-8 平均湾入率と堆積砂量との関係

量が下手地点の堆積砂量増城の経年変化に微妙に関係していること、堆積砂量が多いほど、湾入率も小さくなって、汀線が前進することがわかる。空間平均した湾入率 $\bar{b}/L$ の変化は図-8のようになり、堆積砂量の増大により $\bar{b}/L$ も減少し、平均的に砂浜が前進することがわかる。しかし、堆積砂量がある一定限度をこえると、 $\bar{b}/L$ はほぼ一定に落ち着いてくる。汀線変化量および堆積砂量の変化に關係する砂浜の汀線角度 β の経年変化を示すと図-9のようである。昭和61年以降は微妙な変動を示しながら一定の状態に近づく傾向にあり、動的に安定な海浜への移行が認められよう。

特記されることは、安定な砂浜が沿岸漂砂の上手から次第に形成されたのではなく、養浜が人為的であるというのに加え、砂嘴地形における砂浜の位置ならびにその下手突堤の堆砂機能によっても、安定海浜への移行には場所的な遅速が生じるということである。

最後に、最大湾入率 y_{max}/L について、動的に安定な海

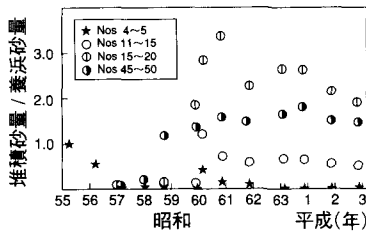


図-6 堆積砂量と養浜砂量との比の経年変化

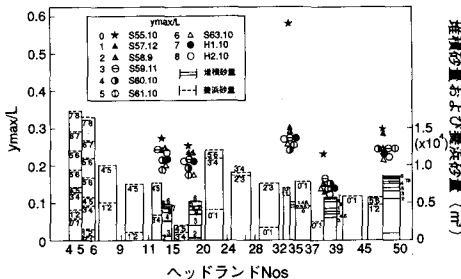


図-7 最大湾入率および堆積砂量の経年変化

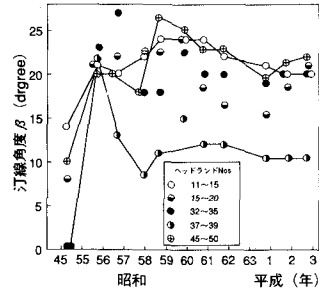


図-9 砂浜群の汀線角度(β)の経年変化

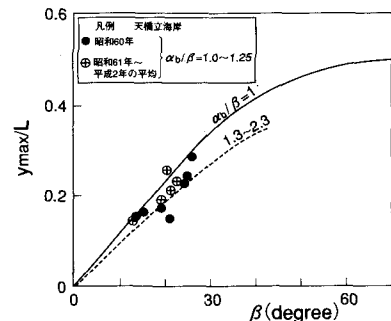
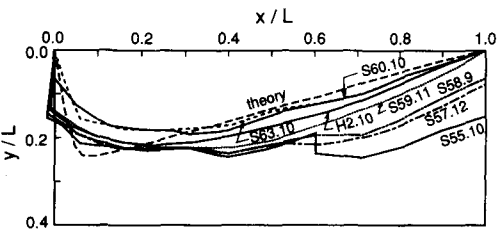


図-10 砂浜群の最大湾入率と汀線角度(β)との関係

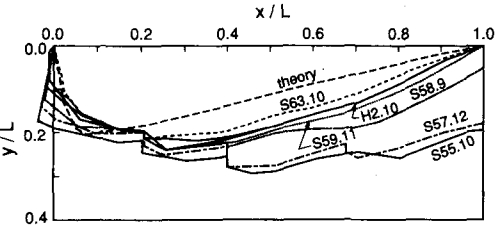
浜の形状特性に関する従来の知見と対比すると図-10のようにプロットされ、 y_{max}/L と β との関係は、土屋(1987)の示した曲線に非常によく一致し、このことから天橋立海岸はすでにかなり動的に安定した海浜を形成しているといえる。

5. 砂浜群の汀線形状と動的安定海浜への移行

安定海浜の理論形状(土屋, 1990; 土屋ら, 1993)を手がかりに、それとの比較を通して、実際の汀線平面形状の経年変化が示す動的安定海浜への移行過程をさらに考察する。図-11は、実測の汀線形状について、動的安定海浜への移行過程ならびに形成過程と理論形状との比較を示す。ただし、理論に用いたパラメーターは、前述の波浪変形計算による代表波浪の碎波特性値および平成2年10月の測量結果による海浜の形状特性から表-1に示すとおりである。実測形状をみると、昭和55年以降の養浜・サンドバイパス工法の適用により、突堤間には経年的に堆砂が進行して汀線は前進し、昭和59年11月時点では、突堤直上手の汀線がその先端に達した。これ



(1) ヘッドランドNos.15~20の場合



(2) ヘッドランドNos.45~50の場合

図-11 汀線平面形状の経年変化

表-1 理論形状に対するパラメーター

特性値 ヘッド ランドNo.	α_b (deg)	β (deg)	α_b/β	L (m)	h_b (m)	L/h_b	y_{max}/L	x/L	m
50	26.4	22.0	1.20	218	1.55	141	0.22	0.30	1/21
39	13.7	13.0	1.05	176	1.44	122	0.14	0.31	1/24
35	25.0	24.0	1.04	84	1.14	153	0.21	0.26	1/20
20	20.8	20.0	1.04	174	1.14	153	0.21	0.26	1/20
15	20.8	20.0	1.04	178	1.07	166	0.21	0.30	1/19

α_b : 入射角, β : 汀線角, L : 突堤間隔, h_b : 碎波水深, m : 平均海底勾配

以降の汀線形状は経年的に汀線を前進させながら、全体的には変動を伴いながら一定の定常状態に落ちつく傾向を示す。定常に近い状態への移行と形成において、実測の汀線形状は理論形状への漸近を示すこと、および理論において波の上手突堤の回折効果を導入していないので、両者の形状は、局所的地形において相違があるものの、全般的形状において一致することなどから、天橋立海岸に現在形成されている砂浜形状は動的安定海浜にかなり近づいているものと思われる。

6. 沿岸漂砂量の推定

海浜群における砂浜地形の経年変動量に関する詳細な測量結果にもとづいて海浜変形の連続式から算出した沿岸漂砂量 Q_x の沿岸分布とその変化を考察する。昭和61年迄は養浜が Q_x の時間的、空間的変動に及ぼす影響が大きいので、ここでは、そうした変動の小さい、61年以後の結果を対象とする。

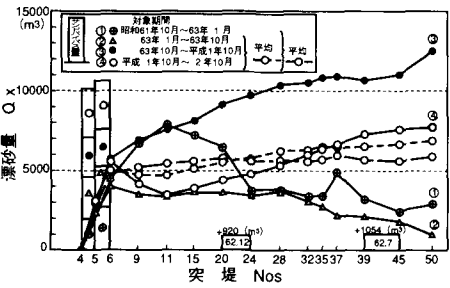
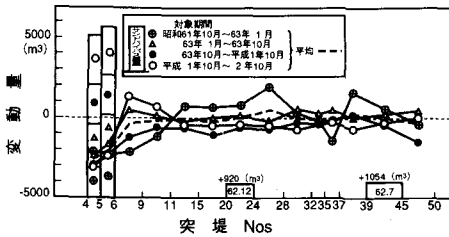


図-12 沿岸漂砂量の沿岸分布とその変化

図-12は、安定海浜への移行過程における沿岸漂砂量の沿岸分布の変化を見出したものである。バイパス量は、年平均5,700 m^3 であり、年によって余り変わらない。図において、 Q_x の沿岸分布には、年によって、 $\partial Q_x/\partial x > 0$, $\partial Q_x/\partial x < 0$ および両者の共存する三つのパターンが存在し、これらのパターンには次のような対応関係が存在している。期間②から次の期間③への移行では、 $\partial Q_x/\partial x < 0$ の状態から $\partial Q_x/\partial x > 0$ の状態へ変化していることから次のことがいえる。まず②では海浜全体において沿岸漂砂が下手方向に減少しているから、全体に漂砂を堆積させており、末端の突堤 No. 50 では1,000 m^3/yr 程度の漂砂量となっているのに対し、つぎの③では海浜全体に、沿岸漂砂量が増大し、突堤 No. 50 では12,000 m^3/yr にもなっている。これは、②の期間に堆積した土砂と③の期間の始めに投入したバイパス量とが沿岸漂砂量として輸送された結果である。しかし、そのつぎの年の④の期間には海浜群において $\partial Q_x/\partial x < 0$, $\partial Q_x/\partial x > 0$ および $\partial Q_x/\partial x \approx 0$ を示す区域が現れ、 Q_x の沿岸方向分布の変動は②、③に比べてかなり小さく、平均的には海浜群のど



図一13 地形変動量の沿岸分布とその変化

の地点においてもサンドバイパス量程度の沿岸漂砂で均衡していることがわかる。このことは、動的に安定に近い海浜では、沿岸漂砂の非平衡が生じて、海浜群がこれを平衡させる方向に自己調節する機能を発揮しているのではないかと、つまり、突堤によるヘッドランド群がそれぞれに漂砂の堆積や砂浜の侵食を微妙に調節しながら全体として海浜を安定化させる方向に有機的に機能しているように考えられる。沿岸漂砂量の微分は、海浜群における地形変動量と対応することから、図一13に地形変動量の沿岸分布を示す。突堤群によって異なるが、平均的には、年間最大 $\pm 1,000 \text{ m}^3$ 程度の砂浜土量の変動に対応して、沿岸漂砂量は、およそ $10^3 \sim 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の範囲で沿岸方向に分布することになる。このような変動が存在しても、図中の破線で示した年平均でみた沿岸漂砂量は約 $5,300 \text{ m}^3$ で、沿岸方向に様に分布し、この量は丁度サンドバイパス量と極めてよく一致することから考えると、現在天橋立海岸の大天橋における漂砂システムは、動的に安定な海浜形成に対して非常にうまく稼働していると評価されよう。以上より、今後のサンドバイパスによる海浜の維持についてつぎのようにいえよう。すなわち、現在形成されている動的に安定な海浜を維持するのに必要なサンドバイパス土砂量は $5,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ 程度で十分であり、過剰養浜による漂砂量や砂浜土量の増大や変動を助長しないように適切な土砂管理をしていくことが望まれよう。また、サンドバイパス量の大きさおよび漂砂量の変動の最小化がどこまで可能かという課題はなお残されているように思われる。

7. 結 語

本研究で得られた主要な結果を要約すると、次のとお

りである。1) 天橋立海岸にサンドバイパス工法の適用によって突堤間に形成されてきた砂浜群は、すでに動的に安定な海浜群にきわめて近い状態にまで達していることがわかった。すなわち、安定海浜の理論形状を手がかりに、実測の汀線平面形状が、変動を小さくしながら、全体的には、ある一定の状態に収束し、その状態およびそれまでの移行過程が、全般的にみて、理論形状に漸近することにより確認された。2) このことおよび安定海浜形成過程における沿岸漂砂量の大きさ、それと砂浜の変動量との関係から、この海岸のサンドバイパス工法として必要なバイパス量は、適切な管理をすることを怠らなければ $5,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ 程度で十分であることがわかった。このような動的に安定な海浜群を形成させることによって、サンドバイパス土砂量を的確に管理することができるのはサンドバイパス工法の一つの規範として評価されよう。

最後に、本研究の実施にあたっては、長年にわたる運輸省の協力により天橋立海岸の侵食対策および海岸整備調査で得られた成果の一部を利用して、種々のご配慮を頂いたことに対し謝意を表す。天橋立海岸の諸問題については、岩垣雄一京都大学名誉教授よりご助言を頂いた。また、この研究において、元学生和田宙司氏(現東北電力)の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 京都府港湾事務所 (1987): 宮津港天橋立海岸侵食対策調査報告書, pp. 1-70.
- 黒田秀彦 (1985): 甦える天の橋立, サンドバイパス工法調査報告, みなとの防災, 第78号, pp. 17-26.
- 土屋義人 (1987): 海岸侵食の制御, 土木学会論文集, 第387号, II-8, pp. 11-23.
- 土屋義人 (1990): 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回海岸講習会講義集, pp. 11-26.
- 土屋義人 (1991): 安定海浜工法, その理論と実際, 土木学会誌 (3月号), pp. 15-17.
- 土屋義人・陳活雄・和田宙司 (1993): 安定海浜の形成 — その理論形状と適用性 —, 海岸論文集, 第40巻, pp. 371-375.
- 矢島道夫・上蘭晃・矢内常夫・山田文雄 (1982): 天橋立におけるサンドバイパス工法の適用, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 304-308.
- Bascom, W. (1970) (吉田耕造・内尾高保訳): Waves and Beaches (海洋の科学), 河出書房新社, 288 p.