

安定海浜工法への景観設計の導入

山下隆男*・小野博之**・中村良夫***

1. 緒 言

安定海浜工法は、現在わが国ではヘッドランド工法とも呼ばれているが、1960 年代に Silvester (1972) により提案された工法で、自然界に見られる U 型の安定なポケットビーチを模した海浜を形成させることで、侵食に対して強い、安定な海浜を造成しようとする方法である。シンガポールでのヘッドランド工法の成功後、京都大学防災研究所において、土屋ら (1982) により、この工法の海岸工学的な基礎研究が行われ安定海浜工法として確立された。この工法は、わが国では和歌山県の白良浜に最初に適用され、その後、ヘッドランド工法と称されて、茨城県の大野鹿島海岸、西湘海岸等多くの海岸に適用されるようになった。自然の法則に逆らわないで海岸波浪のエネルギーを消散させ、漂砂量を制御し海浜を安定化させる点がこの工法の長所であり、養浜工と併用すれば、少ない維持養浜で、効率的な自然海浜の造成が可能となる。わが国のように、養浜砂に費やす経費が大きい場合に適した工法である。

1950 年代以降の欧米の海岸保全対策は養浜を主体としたソフトビーチ化に移行しており、わが国においても海浜の安定化を目指したソフト工法、安定海浜工法、が主体となってきている。特に、高価な養浜砂の使用を余儀なくされる工事の場合には環境のみならず景観にも配慮した海浜の設計を求められる場合が多く、海岸工学的設計と景観設計を融合した安定海浜の設計方法の確立が必要である。

本研究では日本三景の一つである天橋立と近畿圏随一の海水浴場である白良浜を例として、景観設計を考慮した動的および静的安定海浜の造成との方法を検討した。さらに、天橋立の場合には、景観そのものの評価とそれを経済価値に変換することを試行した。

2. 安定海浜工法

2.1 安定海浜の設計

安定海浜の設計概要を示すと以下のものであろう。

(1) 外力の調査：常時波浪、異常波浪について来襲波浪特性、海浜流特性を調査する。前述したように、日本海沿岸に安定海浜を設計する場合には、吹送流による沿岸漂砂（広域漂砂系）を明確にする必要がある。そのため、波浪のみならず海上風を外力調査に加えるべきである。

(2) 漂砂系の調査：漂砂系（沿岸漂砂の閉じる範囲：漂砂セル）を明確にする。その後、安定海浜造成後の許容沿岸漂砂量を推定し、動的安定海浜を形成するのか静的安定海浜にするのかを決定する。前者は沿岸漂砂をゼロにするもので、後者は沿岸漂砂を許容する。

(3) 安定海浜の配置：長期的な沿岸漂砂特性および広域漂砂特性を踏まえて、制御すべき漂砂系と沿岸漂砂量を決め、安定海浜の配置を行う。

(4) ポケットビーチの平面形状の設計：漂砂系の調査結果を踏まえて、湾入率と横堤の長さを決定する。ポケットビーチの最終平面形状（十分な養浜砂の補給で海浜が静的に安定になった場合の形状）は、Hsu ら (1987) の方法により、次式で予測できる。

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 β は卓越来襲波浪の波向き、 R 、 R_0 、 θ の定義は、図-1 に示すようであり、係数 C_1 は図-2 のように、入射角 β に応じて変化させる。さらに、異常波浪時の養浜砂の流失量の推定を行い、維持養浜砂計画を立てる。この場合には、平面 2 次元海浜流モデルによる流失養浜砂量の推定は好ましくなく、3 次元海浜流モデル（例えば、加藤ら、1998）を用いたシミュレーションを推奨する。ついで、ヘッドランドの安定設計を行う。

(5) 養浜砂：粒径、鉱物組成の調査の後、採取量、採取場所を決める。

(6) 景観設計：ヘッドランドの設計時に周辺環境になじむような景観となるよう、湾入率と横堤の長さ、ヘッドランドの高さ、形式（潜堤形式か否か）を決める。

* 正 会 員 工 博 京都大学助教授 防災研究所
** 学生会員 京都大学大学院工学研究科
*** 正 会 員 工 博 京都大学教授 大学院工学研究科

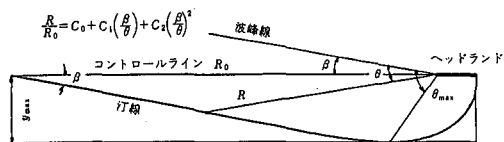


図-1 安定海浜の平面形状を求めるための変数の定義 (Hsu ら, 1987)

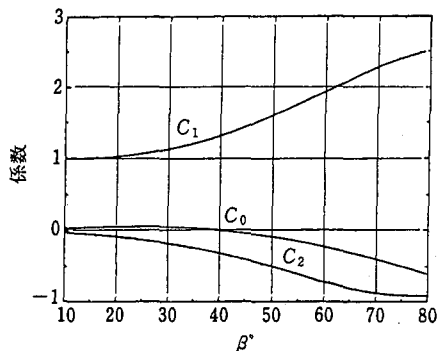


図-2 係数 C_i と入射角 β との関係

2.2 養浜との併用

砂浜海岸は高い消波機能と環境維持機能を持っており、景観面からも望ましい海岸形態である。近年、砂浜そのものが海岸保全にとって最も適した構造物であるという考えが支持されるようになってきた。欧米では1920年代から養浜による海浜の維持対策が始まり、1950年代には養浜工法が海岸保全工法として定着した(山下ら, 1997)。その後の海浜変形予測技術の進歩に伴い、養浜工だけで海岸保全が可能になり、最近では海岸保全に堤防や護岸等のハードな構造物を排除する考え方が定着してきた。この理由は、養浜により海浜を造成したり維持する方法は工事費が安く、優れた防災機能を持ち、環境に優しく、柔軟性があり、景観的にも受け入れられやすいからである。しかしながら、海浜は常に動的で、ストーム時には侵食され、うねりにより回復する「変形」を繰り返す構造物である。このため、建設後もモニタリングや変形予測を行い、維持管理する必要がある。わが国において、今後、養浜工が欧米並みに受け入れられる可能性は少ないであろうが、安定海浜工法のような形で、構造物と併用した養浜は増加することは確実である。そのためには、海底土砂質、土砂量の全国的調査、砂利採取に伴う環境への影響評価法の確立、砂利採取法の検討、等海岸工学の分野で総合的に実施しておかなければならない検討事項は少なくない。

景観・環境を考慮した海浜造成に対する費用-便益解析法について Dean (National Research Council, 1995) を参考にして、養浜の設計において検討すべき項目をリ

ストアップし、安定海浜工法と併用した場合の費用、便益、環境質に関する検討事項を以下に示す。

(1) 費用：建設費、漁業補償等周辺海岸への悪影響に対する補償、周辺インフラへの負荷の増大等を計上する。

(2) 便益：防災、環境保全、レクリエーションによる経済活性化効果の他に、海岸防災対策の程度と背後地の地価、評価額の変化、海岸に来る消費者の落とす金の余剰価値、アメニティ感覚の変化、周辺海岸への影響(漂砂下手側海岸の漂砂源となる)を考える。

(3) 環境質の価値：便益を評価する場合、養浜プロジェクトにおいて、環境質のような非市場財の価値をどのようにして貨幣価値に置き換えて評価するかが問題である。このために、Travel Cost Method (旅行費用換算法)、ヘドニック法 (Hedonic Price Method)、擬似的市場法 (CVM: Contingent Valuation Method) などが一般的に用いられている。しかしながら、どの方法にも一長一短があり、対象とする環境質によって、方法の評価は異なる。CVMは価値意識法とも呼ばれ、環境質の内容を被験者に説明した上で、その質を向上させるために支払ってもよい費用(金額支払い意思額、WTP: Willingness to Pay)、または悪化した環境質のものと効用水準を補償してもらうときに必要であると考えられる補償金額(受取補償額、WTA: Willingness to Accept)を直接的に質問する方法である。

(4) 養浜砂源の調査(施工前モニタリング)：養浜に使用できる砂礫(養浜砂源)の調査を行い、そのデータベースを作成する。養浜砂源としては、以下の4つの可能性が対象となろう。i) 沖浜の養浜砂源：殆どのプロジェクトで用いられる方法である。養浜に使用できる沖砂の位置、量を事前に調査しておきデータベース化しておくべきである。ii) 外浜の養浜砂源：構造物に止められた漂砂のサンドバイパスや漂砂下流端に堆積した砂の逆サンドバイパスを行う。iii) 陸上養浜砂源：河川砂、砂丘砂、陸砂(海岸段丘等)。iv) 輸入・人工養浜砂源：養浜砂の輸入や人工的に破碎した岩石の使用。

(5) 養浜工設計法の確立：外力条件や設置条件に応じて、運搬方法、設置位置(沖にマウントを設置する養浜、バーム・前浜・外浜の養浜)、水質環境への配慮、工事管理、海浜変形予測等の設計法を確立する必要がある。

(6) モニタリング：維持養浜の必要時期を見極め、養浜方法の技術的問題を発見し対策を立てるために、定期的なモニタリングを行う必要がある。工期毎に以下のようなモニタリングが行われる。

i) 施工前：設計に必要な養浜地のデータ(気象、海象、海浜特性)。ii) 施工中：施工状況、養浜砂量、養浜位置、

養浜砂の粒径。iii) 施工後：海浜断面形状、粒度特性、気象・海象データの定期的取得。プロジェクトの実行性を確認するためのデータとなる。これにより、維持養浜の必要性、技術的問題の発見、施工後の対策を検討する。

以上、動的および静的安定海浜の設計方法を示した。波浪場、吹送流場、海海底質調査、養浜方法、安定海浜形状とヘッドランド規模の決定方法、養浜砂のボーサイトの調査方法、施工後のモニタリングについてこれまでの知見をまとめた。

3. 景観設計の導入の検討

3.1 一対比較法

安定海浜の形状を決定する場合、ヘッドランド間隔と沖出し距離、ヘッドランドの横堤の長さにはある程度の自由度があり、これを景観からみてベストな方法で決定することを提案した。景観を評価する方法として一対比較法を用いた。一対比較法とは、いくつかの景観の代替案を提示された時に、それらを良いものから順位付けする時の方法で、代表的な心理学測定法のひとつである。例えば n 個の刺激があるとする。この n 個から 2 つを取り出すとき、考えられる全ての組 (nC_2) について、アンケートにより、一定の基準に従って最も価値ありと判定されるもの、例えば最も美しいもの、最も良いと思うものを通常は 1 つだけ選択させ、このようなことを多数の評定者に行わせ、選択された回数だけの得点を与える。もし、ある評定者 1 つだけ選択することができず、2 つまたは 3 つを同時に選んだときは、1/2 点または 1/3 点を与える。結果は各対象についての総得点の形で与えられるので、これを大きい方から小さい方へ配列し、順位を決定する。まず頻度の大小の順に従って刺激の順位を決定し、 $k > j$ と判断される割合 $p_{k>j}$ を得る。次に $p_{k>j}$ が正規分布すると仮定して、 Z 値に変換しこの列毎の平均値を尺度値とする。以上の方法により、各刺激について順位づけを行う。

3.2 動的な安定海浜の天橋立海岸への試行

天橋立海岸の侵食が深刻化したのは 1955 年頃からで、漂砂上手側の日置港、江尻港の防波堤建設時期と一致する。京都府の調査および陳 (1992) の研究成果を総合すれば、天橋立海岸の沿岸漂砂量の変化特性は以下のようなものである。

(1) 約 500 年前から小天橋砂洲形成間の沿岸漂砂量は約 $6,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定される。砂嘴を形成したこの沿岸漂砂量はこの海岸 (底質特性が変化していないと仮定する) の自然営力 (波浪外力) を代表していると考えることができる。(2) 日置港、江尻港の防波堤により阻止された沿岸漂砂量は、防波堤に堆積した土砂量から、約 $4,500 \text{ m}^3/\text{yr}$ と推定される。この沿岸漂砂量は天橋立海

岸を維持するのに必要な約 $6,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ に達していない。これは背後地が開発されたことによる河川流送土砂量 (漂砂源) の減少を意味しており、天橋立海岸の侵食の主要因であると考えられる。さらに、両港の防波堤が減少した沿岸漂砂を完全に止めたため、昭和 30 年頃から天橋立海岸の急速な海岸侵食が発生した。(3) 天橋立海岸の侵食対策として、昭和 43、44 年に小規模突堤群 (ブロック製、長さ 15 m、50 m ピッチ)、昭和 45～49 年には大規模突堤群 (自然石、長さ 30 m と 70 m、200 m ピッチ) が設置された。この突堤工により、沿岸漂砂量は約 $4,500 \text{ m}^3/\text{yr}$ に減少したと推定されている。このことは、漂砂上手側の日置港、江尻港の防波堤により阻止された沿岸漂砂量を全てサンドバイパスすれば天橋立海岸の侵食は制御できることを意味している。(4) 天橋立海岸を流れる沿岸漂砂は小天橋砂洲付近に堆積する。これは、地形的要因により自然営力 (波浪外力) がこの付近で減少するからである。このため、大天橋と小天橋との間の水路を維持する浚渫が必要となる。現在行われている維持浚渫土砂量が約 $4,500 \text{ m}^3/\text{yr}$ であることから、漂砂の収支 (連続性) が確認できる。この維持浚渫土砂は天橋立海岸のサンドバイパス用に使われているので、日置港、江尻港の防波堤により阻止された沿岸漂砂量 (約 $4,500 \text{ m}^3/\text{yr}$) が余分にあることになる。すなわち、養浜工を計画する場合、約 $4,500 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜砂の確保が可能であることになる。ここで注意しなければならないことは、養浜砂は汀線を前進させるために海岸に置かれる砂であり、サンドバイパス用の砂は、沿岸漂砂として流す砂である。養浜をしなければ汀線は前進せず、サンドバイパスをしなければ汀線は後退することになる。

以上のような調査結果に基づき、以下の 6 ケースの海岸の造成を想定する。また、これに必要な海岸砂量、工事費、維持費を概算する。

① 現況の場合：約 $4,400 \text{ m}^3/\text{yr}$ のサンドバイパスが必要である。② 突堤を全て除去する場合：約 $6,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ のサンドバイパスが必要である。もし、浜幅を 20 m 広げようとするれば、約 $96,000 \text{ m}^3$ の養浜砂が必要となる。③ 突堤間隔 2 倍 (400 m 間隔) の場合：単純に突堤の長さも 2 倍の 60 m として 7 基の突堤を建設し、養浜を行うと約 $144,000 \text{ m}^3$ の養浜砂が必要となる。その代償として、沿岸漂砂量を減らすことができるが、動的に安定な海浜が形成されるとして、現状の 3 割強程度 (約 $1,500 \text{ m}^3/\text{yr}$) になるものと推定される。④ 突堤間隔 1/2 倍 (100 m 間隔) の場合：現状に極めて近い沿岸漂砂量となり、約 $4,400 \text{ m}^3/\text{yr}$ のサンドバイパスで維持でき、養浜砂は不要である。⑤ 突堤間隔 3 倍 (600 m 間隔) の場合：突堤長さ 90 m となり、先端水深は 4.5 m で、沿岸漂砂を完全に止めた静的に安定な海浜が形成される。この



①現状



②突堤なし



③突堤間隔 2 倍



④突堤間隔 1/2 倍



⑤突堤間隔 3 倍



⑥突堤間隔 1/3 倍

写真-1 天橋立のケース



①現状



②横堤を潜堤にする



④横堤の長さ 1.5 倍

写真-2 白良浜のケース

ため、サンドバイパスは必要無くなり、突堤建設と養浜を行えばよい。養浜砂量は約 648,000 m³ となる。⑥ 突堤間隔 1/3 倍 (70 m 間隔) の場合: 1/2 倍 (100 m 間隔) の場合と同様と考える。

天橋立の景観を良くするためのヘッドランド間隔を、一対比較法 (被験者数 89 人) によって調べた。対象とした想定ケースは写真-1 に示す、①現状、②突堤なし、③ 2 倍間隔、④ 1/2 間隔、⑤ 3 倍間隔、⑥ 1/3 間隔である。視点は、観光客が訪れる橋立ビューランドからのものとしてある。一対比較法により得られた尺度は、④ 0.583 ① 0.111 ⑥ 0.018 ② -0.132 ⑤ -0.150 ③ -0.430 となった。

この結果を利用して CVM (被験者数 38 人) を適用して景観を貨幣価値へ換算することを試みた。一対比較法で順位付けされて出てきたもののうち 1 位と 6 位に対してのみ CVM を適用した。支払意思額の質問方法は、自由回答方式、支払いカード方式、二段階二項方式などがあるが、本研究では面接による自由回答方式を試みた。被験者数 38 人に 1 位と 6 位の写真を見せて、「天橋立を保全するために各世帯から、基金を募りたいと思いますが、あなたは世帯主として年間いくら出資する意思がありますか?」と質問して、投資する金額を記入してもらった。38 人の回答のうち、上位と下位 2 つずつを切り捨て、平均すると、6 位の③へは、3750 円/年、1 位の④へは 5729 円/年であった。これより、①から⑥までの出資額を推定して、大きい順に並べると次のようになる。④ 5729 円、① 4807 円、⑥ 4627 円、② 4332 円、⑤ 4296 円、③ 3750 円/年となる。この結果を用いて、環境 (景観) の経済価値は『価値 = 支払い意思額 × 対象世帯数 × 対象期間』で評価して、この海岸の保全を実施するためにはどの程度の工事費が投資できるかを検討することができる。

3.3 静的に安定海浜、白良浜への試行

白良浜は、権現崎側で接する天然の岬と、反対側の湯崎で接する T 字突堤によって安定化されている。景観上の評価すべき点としては、海浜内・外部から眺めた岬方向の眺めは、視線を遮る人工物がなく砂浜と岬との一体感が得られる点である。しかし海浜内・外から眺めた突堤方向の眺めは、T 字突堤付近で砂浜の分断感が生じる。本研究では湯崎側の T 字突堤に注目し、現在の T 字突堤による堆砂効果が失われない範囲内で景観的に最も良いと思われるものを模索する。T 字突堤に対して肯定的な意見を持っている人、また否定的な意見を持っている人のことを考慮し、現状を基準にして現状も含めた、次の 6 ケースを提案した。①現状、②横堤を潜堤化する、③横堤の長さ 1/2 倍、④横堤の長さ 1.5 倍、⑤横堤の幅 2

倍、⑥横堤の長さ 1/2 倍でかつ幅 2 倍。T 字突堤方向の眺めを、海浜内と海浜外について 2 パターン考え、写真-2 を作成し、これを用いて、一対比較法による景観の尺度を求めた。

得られた結果は、② 0.642 ③ 0.338 ⑥ 0.063 ① 0.027 ⑤ -0.293 ④ -0.785 であった。この結果より、②が最も景観的に良い印象を与えることがわかった。やはり T 字突堤はできるだけ目立たなくする方が良いということが確認できた。また横堤の沿岸方向長さのファクターが幅のファクターよりも景観的には悪い影響を及ぼしていることも示された。

4. 結 言

以上、日本三景の一つである天橋立と近畿圏随一の海水浴場である白良浜を例として、海岸保全において今後ますます重要になってくるであろう景観設計の方法を導入した安定海浜工法の設計法を検討した。得られた主な結果は、以下のようである。

(1) わが国において安定海浜工法を養浜工と併用して行う場合の検討事項をまとめた。海岸工学的設計と景観設計を融合した安定海浜工法の設計について検討し、天橋立と白良浜について適用例を示した。

(2) 天橋立について、一対比較法による結果より、突堤の幅は「景観突堤間隔 1/2 倍」が最も景観的に良いことがわかった。さらに、景観の経済価値の算出方法として、CVM を適用し、景観への価値評価を試みた。

(3) 白良浜について、ヘッドランドの形を変えた場合の景観評価を行った結果、最も良いと思われるものは「ヘッドランドの横堤を潜堤とする」場合であることがわかった。

参 考 文 献

- 加藤 茂・山下隆男・安田孝志・三島豊秋 (1998): 高次乱流モデルとローラーモデルを援用した海浜流の 3 次元数値解析, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 191-195.
- 陳 活雄 (1992): 砂嘴地形海岸の侵食と制御に関する研究, 京都大学学位論文, pp. 217-250.
- 土屋義人・芝野照夫・西島照毅 (1982): 安定海浜の形成に関する実験的研究, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 274-278.
- 山下隆男・土屋義人・D. R. Basco・M. Larsen (1997): 日, 米, 欧の海岸保全の相互評価 (1) 一役食要因と対策一, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 691-695.
- Hsu, J. R. C, R. Silvester and Y. M. Xia (1987): New characteristics of equilibrium bays, Proc. 8th Australian Conf. Coastal and Ocean Eng., pp. 141-144.
- National Research Council (1995): Beach Nourishment and Protection, National Academy Press, 334p.
- Silvester, R. (1972): Headland defense of coasts, Proc. 15th ICCE, ASCE, pp. 1349-1406.