

海岸保全施設としての「砂浜」の考え方

FUNCTIONS OF SANDY BEACH AS SHORE PROTECTION FACILITY

宇多高明¹・石川仁憲²・福濱方哉³・山田浩次⁴

Takaaki UDA, Toshinori ISHIKAWA, Masaya FUKUHAMA and Koji YAMADA

¹正会員 工博(財)土木研究センター理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

²正会員 工修(財)土木研究センターなごさ総合研究室(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

³正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室長(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

⁴正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

Various functions necessary for designating a sandy beach as shore protection facility under the Coastal Act are discussed. To perform beach nourishment effectively with least damages to a coast, the selection of fine and medium sand as a material is required, whereas nourishment using coarse sand or gravel is effective to raise foot protection effect of a seawall. Beach parameters necessary for planning of a beach profile are shown to be the berm height h_b , depth of closure h_c , beach slope between h_c and h_b , and backshore width. A method selecting an appropriate grain size for nourishment is also shown in terms of grain size distribution.

Key Words: Beach nourishment, methodology, grain size

1. はじめに

1999年に改正された海岸法では、第2条1項の規定により海岸管理者が「砂浜」を海岸保全施設として指定できるようになった。砂浜は消波機能に加え、構造物の根固め機能、動物・植物の生息環境機能、水質浄化機能、レクリエーションや学習の場としての機能など様々な機能を有することから、従来型のhard構造物による保全手法に代わり、今後多くの海岸で砂浜による保全(養浜)が進められる可能性が高い。しかしながら砂浜は従来の保全施設の考え方と大きく異なる特徴を有している。例えば、護岸などの海岸保全施設は基本的に被災しない限り施設の一定の機能が長く保持されるのに対し、砂浜では砂が絶えず動きながらある形状が保たれることに特徴がある。その変動も、長期的変化に短期的変動が重なっている。このため、砂浜の管理は時間・空間的にある程度の変動を許容して実施する必要がある。またそれを許さない設計では砂浜としての本質を失うことになる。一方、砂浜の設計では、従来の保全施設と同様、目的達成のための「施設」設計が必要とされる。このように砂浜は、管理と設計で考え方や設定諸元が異なることが特徴である。

養浜の計画・設計・管理に関する考え方について、宇多ら¹⁾は最新の知見をとりまとめたが、砂浜に関する科学的知見には未解明な部分も多く、日々更新されている状況である。そこで、砂浜による海岸保全をより確実に実施するための留意点として、本研究では、砂浜の計画、設計、施工、管理の段階での

考え方を、新たな知見をもとに整理する。

2. 「砂浜」の計画上の留意点

砂浜の防護機能は、1. 波浪エネルギーの減衰により波のうちあげ高や海岸背後への越波流量を低減させる消波機能、2. 洗掘防止による堤防・護岸等の安定性確保(根固め機能)であり、これらの機能は砂浜の断面諸元(後浜高、後浜幅、前浜・外浜勾配、波による地形変化の限界水深 h_0)によって評価できると考えられる。浜幅がほとんどない砂浜では、これら機能が十分発揮されない。断面諸元のうち、海浜の特徴を表す後浜高、後浜幅、前浜勾配は従来の人工海浜の考え方²⁾にも取り入れられているが、海浜全体の安定性の議論には砂の移動範囲全体を含む領域を包含しなければならず、そのため h_0 が必要となる。一方、養浜においては、投入土砂の汀線付近への歩留まりを高めると同時に、漁業障害を除去する観点から、茨城県神向寺海岸では礫を用いた養浜も実施されている³⁾。この方法は、養浜砂が汀線付近に歩留まり、防護機能を維持しつつ外浜沖浜に生息するチョウセンハマグリに生態に影響を与えないという点では評価できるが、礫養浜は常に有効とは限らない。例えば、神奈川県茅ヶ崎中海岸の事例で考える⁴⁾。

侵食を受ける前、茅ヶ崎中海岸は遠浅の海岸であった。図-1は侵食が進んだ茅ヶ崎中海岸中央の測線No.18と、漂砂下手(東)側に位置するヘッドラン

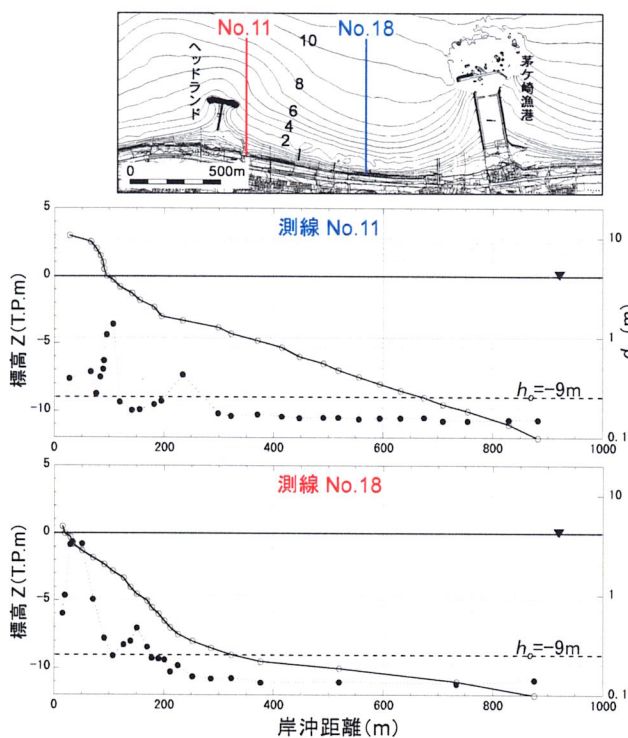


図-1 茅ヶ崎中海岸の測線 No. 11 と No. 18 に沿う海浜縦断面形と d_{50} の分布 (2005 年 10 月 25 日測定)

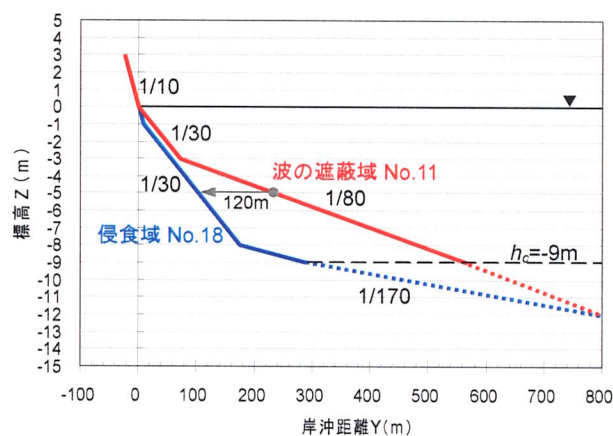


図-2 侵食域 (測線 No. 18) と堆積域 (測線 No. 11) の縦断面形の重ね合わせ

ドによる波の遮蔽域内を通る測線 No. 11 における海

～-3m が 1/30 と相対的に急であるが、沖浜勾配は 1/80 と非常に緩やかである。これに対応して汀線付近の d_{50} は大きく、沖浜の海底面は 0.16mm の細砂で覆われている。一方、侵食域に位置する測線 No. 18 では、汀線～-1m が 1/10、-1m～-8m が 1/30 と急深で、 h_c (-9m) 以深は 1/170 の緩斜面となっている。急勾配で落ち込む汀線付近は d_{50} が No. 11 より大きい。汀線から h_c までの距離は No. 11 ではほぼ 600m あるのに対し No. 18 では 300m であり、汀線近傍に深みが発達している。また、図-1 に示すように、-8m 以深では両測線上の d_{50} はほぼ同じ値を示すが、-8m 以浅では No. 11 が汀線付近まで細粒であるのに対し、No. 18

では汀線に近づくにつれて粗粒となる。このことは、もともと海岸中央付近では沖浜も含めて細砂が大量にあったために緩勾配の海浜であったが、主要成分の細砂が、宇多ら⁴⁾が示したようにこの付近で卓越する東向きの沿岸漂砂により運び去られ、大量の細砂がこの測線付近から消失した結果急勾配となって粗粒の土砂が残されたと解釈できる。この場合、この海岸の h_c は -9m にあるので、侵食域では -9m 以浅の縦断面形が次第に急勾配となりつつ後退してきたと考えられる。

図-1 に示す 2 断面の縦断面形は東西に 700m 離れた測線の形状であり、同一時期の測定値である。しかし海浜変形のエルゴード性⁵⁾に基づく海浜変形の場所的変化は時間的変化を説明すると考えることもできる。図-2 はこれら 2 つ縦断面形の特徴を模式化し、汀線を合わせて重ねたもので、侵食が進んで緩勾配であった海底が次第に急深となる状況を示す。急深になったことで、例えば -5m で碎ける波は約 100m 岸に近づき、防護上危険側にシフトしていることが分かる。

このような縦断面形の特徴は、細砂で構成され比較的緩やかな海底勾配を有する海岸が該当する。沖に細砂があることは、沿岸砂州 (bar) の形成を促し、それによって消波効果が発揮されるとともに、漁業 (しらす漁や地引網) にも有効である。一方、バーの消失は、サーフィンなどの利用面にも重要な影響をもたらす。したがって、このような海岸で粗粒材のみで養浜を行った場合、汀線付近に急勾配の前浜が形成され、そこから沖合では急深な海浜縦断面形とならざるを得ない。すなわち外浜を構成している細砂が大量に補給されて初めて緩勾配の縦断面形となると考えられる。粗粒の土砂のみでは沖合の海底勾配を緩くする効果はなく、しかも沖合の緩斜面を構成する細砂は次第に沿岸漂砂によって運び去られるため、海浜縦断面形は時間経過とともに急勾配化することが免れない。これより沖浜も含めて保全するには、粗粒材のみではなく細砂との混合粒径にすることが望ましいことが分かる。

図-3 は上記 2 断面の粒径含有率の水深分布を示すが、細砂 (0.075～0.25mm)、中砂 (0.25～0.85mm) 以外の粒径成分には違いが見られない。すなわち

が定められており、これら 2 成分が養浜の際重視すべき粒径である。これはまた野志ら⁶⁾が提案した局所勾配と d_p の関係を裏付ける結果でもある。

以上のことから、本来細砂で遠浅の海岸の場合、目標浜幅の確保や護岸の根固め機能としては、汀線付近に留まる粗粒材の投入が有効であるが、沖合の細粒土砂の減少は防護面だけでなく、漁業やサーフィンなどの利用面・環境面にも影響を与えるため、防護・環境・利用の全てにおいて理想的な遠浅な海岸を復元させるには、沖の細粒分も必要であり、最適な養浜材は現地海岸の $h_r \sim h_c$ に分布する底質と同程度の粒径を有する底質材料と結論付けられる。

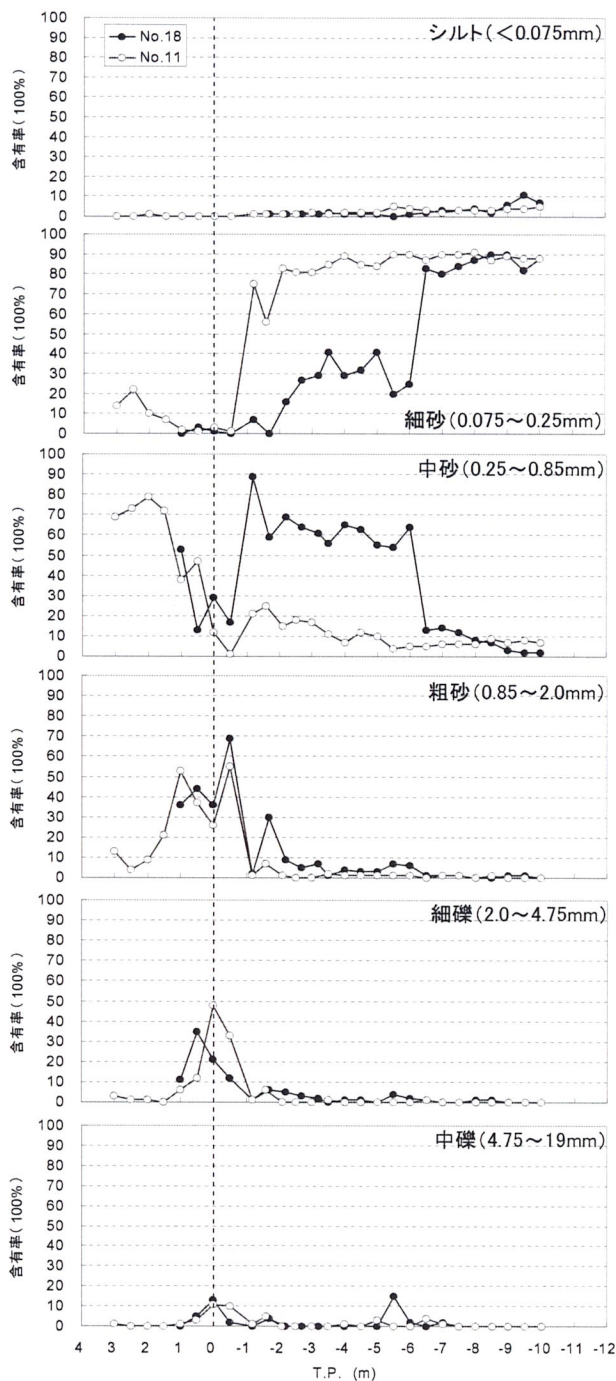
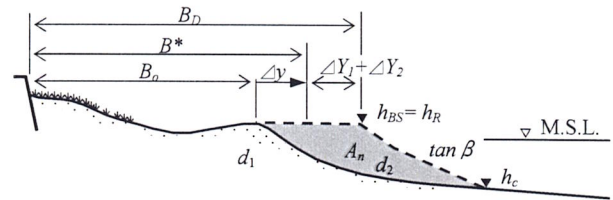


図3 砂浜の設計における検討断面

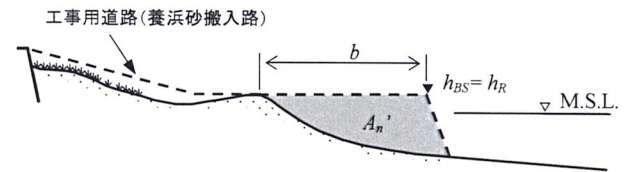
3. 「砂浜」の設計上の留意点

砂浜の要求性能としては、目的を達成するための性能として、消波機能により高潮、波浪または津波による海水の浸入を防止し、また越波流量を許容量以下に減少させること、根固め機能による堤防・護岸等の構造の安定、必要に応じて海岸環境および海岸利用を向上させることである。また、安全性能として、沿岸漂砂の不均衡、不連続による数十年スケールの不可逆的な長期的地形変化、および季節変化やひと時化の高波浪時に侵食し、静穏時に堆積する

a) 機能照査断面



b) 施工断面



B_D : 設計後浜幅, B^* : 必要後浜幅, B_o : 現状の後浜幅
 ΔY : 目標汀線前進量, ΔY_1 : 長期的変化量, ΔY_2 : 短期的変動量
 h_{BS} : 設計後浜高, h_R : バーム高, h_c : 波による地形変化の限界水深
 $\tan \beta$: 前浜・外浜勾配, d_1 : 現地の底質粒径, d_2 : 養浜材の粒径
 A_n : 養浜断面積, A_n' : 施工時の養浜断面積, b : 施工時の養浜幅

図-4 砂浜の設計における検討断面

といった繰り返し生じる可逆的な変化、およびこれに沿岸漂砂の要因が加わった短期的な地形変化に対して適切な安定性を有することである。そのため、設計においてはこれら二つの変化が生じて汀線が後退した場合においても、波浪が背後地に影響を及ぼさないために必要な浜幅（汀線の後退限界位置）、もしくは利用目的に応じた浜幅が確保されなければならない。

砂浜の防護機能を照査する断面の特性は、図-4に示す断面諸元によって定められる。断面諸元は宇多ら¹⁾に示されたように、①後浜高（高潮位時の遡上限界≒バーム高 h_R ）、②波による地形変化の限界水深 h_c （depth of closure）、③前浜・外浜勾配 $\tan \beta$ （ h_c ～高潮位時の遡上限界≒ h_R の海浜勾配、養浜材の底質 d_2 に関係）、および防災機能が発揮される④必要後浜幅 B^* （高潮位時の遡上限界≒ h_R ～護岸等の距離）であり、設計ではこれら諸元を検討する。なお、一般に前浜の沖側から砕波点までを外浜と呼ぶが、地

が元々あることから、砂浜で与える効果は h_c 以上の外浜とすることを提案する。

設計後浜幅 B_D については、波浪が背後地に影響を及ぼさないために必要とされる幅 B^* （汀線の後退限界位置）として波のうちあげ高や許容越波量より定めるが、前述のように高波浪時の一時的な汀線の後退や長期的な侵食により汀線が後退した場合においても防護機能を確保できるように設定する必要がある。よって設計後浜幅は式（1）で与えられる。

$$B_D = B^* + \Delta Y_1 + \Delta Y_2 = B_o + \Delta Y + \Delta Y_1 + \Delta Y_2 \quad (1)$$

ここに、 B_0 : 設計後浜幅、 B^* : 防護・環境・利用の観点から設定した必要後浜幅、 ΔY_1 : 長期的な汀線の後退量（沿岸漂砂による汀線後退量）、 ΔY_2 : 高波浪時における汀線の後退量、 B_0 : 現在の後浜幅、 ΔY : 目標汀線前進量である。なお、防護機能の照査は B^* について行う。これら項目のうち、 ΔY_1 と ΔY_2 は安全性能確保のために見込む項目である。 ΔY_1 は、動的養浜の場合、等深線変化モデルなどを用いて設定する。一方、静的養浜の場合は併用された漂砂制御施設の影響は予め B^* の中に含めることが可能であり、この項については考慮しなくてよい。 ΔY_2 については、現時点では実用的な研究成果が少ないため、対象海岸やその周辺海岸での高波浪による地形変化の測量結果、空中写真等から得られる実際の汀線後退量を参考として設定する。

ここで、内湾の干潟を除けば、一般に海浜はバー・トラフの発達する細砂で構成された遠浅の緩勾配海岸（タイプ A）と汀線付近が急深でバー・トラフを持たない粗砂、礫で構成された急勾配海岸（タイプ B）の二つに類型化できる。

タイプ A は一般に細砂で構成され、海底勾配も $1/50 \sim 1/80$ と緩やかであり、波浪の強弱に応じた短期変動を有し、高波浪時には前浜が削られ砂が沖へと移動しバー・トラフが形成される。これは海底勾配の緩い海岸の沖合に汀線と平行に形成される地形で、バーは周辺より頂部の水深が小さいことから碎波が生じ、人工リーフと同様に消波機能を発揮する。一方、波形勾配の小さい静穏の状態が続くと再び前浜に砂が堆積し、バームが形成される。このような地形変化は、沿岸漂砂によって土砂が運び去られて生ずる侵食・堆積といった長期的変化とは全く別の現象であり、ネットとしての海浜土砂量はほぼ一定値を保つ。したがって、このような短期的変動を長期的ないし地形学的に大きな規模で生起している現象と誤認すると、誤った対策手法を選択してしまう可能性が高まるので注意が必要である。また、浜幅が広い場合、飛砂により内陸へと細砂が選択的に運ばれることも管理上注意が必要である。

タイプ B の海岸は主に礫で構成され、前浜勾配は $1/3 \sim 1/10$ と急であり、写真-1 に示すように高波浪時には汀線が後退するのではなく、逆に護岸前面に



a) 高波浪来襲前: 2006.8.30



b) 高波浪来襲後: 2006.10.7

写真-1 礫養浜を実施した茨城県神向寺海岸における高波浪来襲後の状況

表-1 類型別の砂浜管理の視点（項目）と評価手法

	長期的 地形変化	短期的地形変化		
		季節的な地 形変化	高波浪によ る岸沖の縦 断変化	カスプに起 因する汀線 変化
A: 緩勾配海岸 (細砂)	○	○	○	○
B: 急勾配海岸 (礫)	○	△	×	×
評価手法	等深線変化 モデル	等深線変化 モデル	等深線変化 モデル 簡便の手法	実測データの 解析

なお、実際の施工においてはこれら断面を出来形管理することは、常時波が作用する状況下では技術的に困難である。より効率的な施工を行うためにも、養浜投入後は来襲波浪による自然な形状変化に期待すればよい。したがって、施工段階では図-4 に示す

の種の変動は大きくない。また、顕著な離岸流が発達するのはタイプ A の緩勾配海岸であり、これに関係したラージカスプの沿岸方向の分布に起因する汀線変動も無視できない。逆にタイプ B にあっては汀線付近にリズムミクな凹凸を有するビーチカスプがしばしば発達する。

適切な砂浜の設計・管理には、これら類型別の海浜特性を十分把握することが必要である。以上をふまえ、類型別の砂浜管理の視点（項目）と評価手法を表-1 に示す。表中の○は考慮すべき事項、×は考慮しなくてもよい事項、△は現地特性で判断することを示す。

養浜量を投入するための養浜幅 b を設定すればよい。したがって、砂浜の設計、すなわち養浜設計においては「機能照査」のための断面と、「施工」のための断面での検討が必要とされる。

4. 「砂浜」の施工上の留意点

養浜形状や海浜の安定性は養浜材の粒径に大きく依存するので、適切な方法により養浜材を評価し、所要の安定性を確保することが重要である。養浜材の評価方法として、例えば福濱ら⁷⁾は、目黒ら⁸⁾の

示した混合粒径砂を用いた実験結果に対し、熊田ら⁹⁾の等深線・粒径変化モデルを適用して、底質粒径の相違に基づく分級効果による粒径変化を考慮した縦断形変化の数値解析を行った。この結果、混合粒径砂が細粒砂と粗粒砂に分級し、粗粒砂が岸向きに移動してバームを形成する一方、細粒砂は沖向きに移動して h_c 以深に落ち込むという特性がモデルによりよく再現された(図-5参照)。バームの形成は急速に進むが、沖での細粒砂による地形変化はなかなか安定に至らないという特性も再現されている。含有率を変化させた計算によれば、粗粒砂量を増やすとバームの形成により前浜が増大して汀線の前進に寄与し、逆に細粒砂量を増やすと h_c 以深への流出が増えるという結果も出ている。養浜では、初期含有率によってはバームを構成するとともに汀線付近に急勾配をなして堆積する粗粒分に限りがある場合も多い。そのような場合、養浜砂は沖向きに移動して安定に達することがないという結果となる。これは養浜時に十分注意すべき点である。なお、この研究は、目黒ら⁵⁾の実験結果の再現を主目的にしているから、他の実験や現地海岸へ適用する場合、本研究の諸係数値は普遍性を有していないので、個別検討が必要である。現地海岸へ適用する場合には、海岸毎にバーム高、 h_c 、粒径別の平衡勾配を対象海岸の縦断測量結果、粒径と粒度組成の岸沖分布などを参照して個々に設定する必要がある。

また、前述したように沖合も含めて海浜を保全するには、細粒分の供給を考慮する必要がある。最適な養浜材は現地底質と同程度となる。したがって、養浜材の歩留まりと割増し率については、底質粒径を十分考慮した方法として、対象海岸の現状の底質と養浜材の粒径加積曲線から判断できる。例えば、沖合の緩傾斜を成す細砂 0.075~0.25mm が必要で、かつ 0.25mm 以上が汀線前進に効果的である前述の神奈川県茅ヶ崎海岸の場合、図-6 に示すように現状の底質より細粒分を多く含む養浜材 A では汀線前進が望めない。シルト粘土分が 23%を占める養浜材 B は、海岸保全には 80%程度しか寄与しないが、0.25mm

以上の粒径が 50%を占めるので、投入土砂の 50%程度は汀線前進に寄与する。汀線前進のみを主目的にする場合は、投入量に見合う汀線前進量は期待値の半分程度と考えてよいので、この土砂を養浜に用いる場合は計画量の 2 倍の養浜材が必要となる。一方、養浜材 C のように、粗粒材を多く含む場合は、前浜の拡幅には効果的であるが、遠浅の海岸に戻すために必要な細砂 0.075~0.25mm をほとんど含まないため、外浜の保全には効果的ではない。

5. 「砂浜」の管理上の留意点

海岸保全施設として指定された砂浜を適切に管理するには、他の海岸保全施設と同様、防護など要求性能が維持されているかを確認する必要があるが、従来の保全施設は基本的に被災しない限り機能が維持されるのに対し、砂浜は砂が絶えず動きながら形状が維持されていることに特徴がある。砂の自由な移動を許すことが海浜にとって自然らしさを保つ上で本質的に重要であることから、自由な変動を許容しつつも海岸保全上問題が起こらないよう、時間・空間的にある程度の変動の枠の中で管理を行うこととなる。したがって、絶えず変形を繰り返している砂浜を適切に管理するには、これまで以上に漂砂特性を理解し、判断する能力が要求される。また海岸侵食のメカニズムを十分理解することが必要とされる。例えば、管理水準を割ったことで、直ちに災害とはいきれず、そのためには現地海岸の特性を十分把握する必要がある。また海岸保全施設としての砂浜海岸を管理するには、防災機能を保持することが重要であると同時に、必要に応じて利用および環境上の要請に応えることも重要である。

管理水準については、日常的に変動する砂浜の特性から、図-7 に示すように、設計諸元より「越波を許さない」「堤防・護岸が洗掘を受けない」などの要求を満たす最低条件を定める断面諸元と、これによる断面積とすればよい。なお、管理水準は今後の

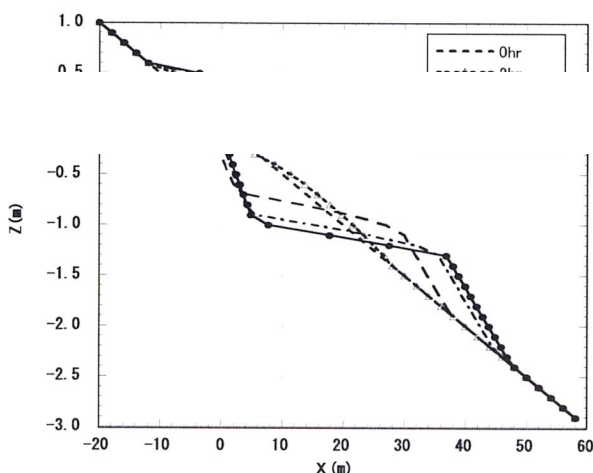


図-5 粒径を考慮した等深線変化モデルによる縦断形変化予測の一例⁷⁾

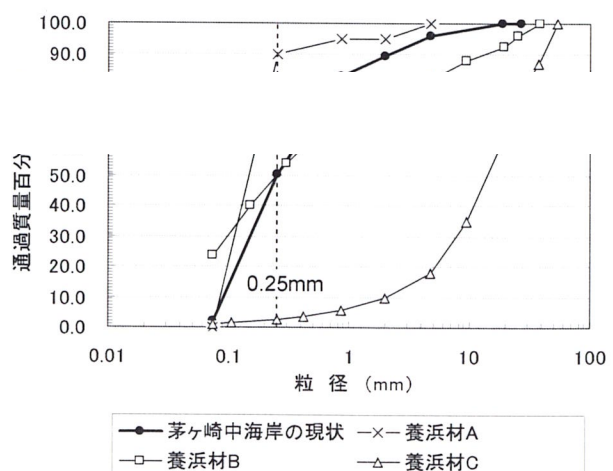


図-6 粒径分布から見た適正な養浜材の選別法

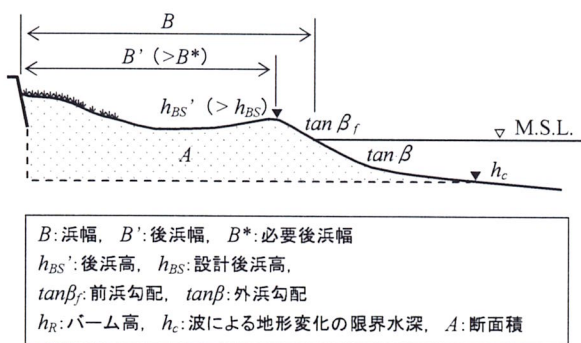


図-7 砂浜の管理における検討断面

土砂収支状況の変化や保全事業の実施等の管理行為によって変化するので、管理計画とともに目標値も変動することに留意する必要がある。

管理においては、定期的な横断測量や深淺測量などに加えて、砂浜形状は外力条件に大きく影響を受けるため、高波浪来襲後などの日常的な管理も必要である。しかしながら、外浜勾配や h_c など水面下の情報をそのたびごとに把握することは困難である。したがって日常的な管理では、汀線より陸側の断面諸元を簡易に計測し、管理水準を満足しているか否かを確認するとともに、侵食が生じている場合は、その状況が異常かつ不可逆的な変化か否かを判断する。この場合、筆者の経験から現地では次の点を確認し、総合的に判断する必要がある。①浜幅（後浜～汀線）が測量時期の異なる同位置の海浜縦断形の重ね合わせなどから判断した短期変動幅内であるか、②浜崖の沿岸方向の比高分布と、これにより推定される漂砂方向の確認。一般に比高が減少する方向は沿岸漂砂の方向を示している。場所的に一様な現象として観察されれば現象は岸沖漂砂起源のことが多い。③バームの沿岸方向の分布の確認。沿岸方向に一様であれば岸沖変動が主要因と判断できる。④底質が極端に粗粒化していないか。⑤そのときの外力条件はどの程度であったか。異常気象ではないか。

以上のように、「砂浜」を適切に管理するための考え方について、これまでの筆者の経験や新しい知見をふまえて整理・提案したが、適切な管理を実施するためには、前述したように現地海岸の特性を十

6. まとめ

「砂浜および養浜」に関する計画、設計、施工、管理の各段階の考え方を最新の知見をふまえて整理した。今後の課題としては、安全性能として季節変化やひと時化の高波浪時に生じる短期的な地形変動の設定方法があげられる。現状で最も信頼できるのは、現地測量結果より解析した地形変動であるが、実際には測量データ等の資料が少ない、もしくは毎年1回実施していても季節変動が捉えられていないなどの問題点がある。予測精度を高めるには、汎用性の高い数値計算モデルの開発が期待される。

謝辞：本研究を進めるにあたって神奈川県藤沢土木事務所より多くの資料を提供していただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 宇多高明・石川仁憲：「実務者のための養浜マニュアル」、(財)土木研究センター，p. 170, 2006.
- 2) 土木学会海岸工学委員会ほか：「海岸保全施設設計便覧」，(社)土木学会，p. 582, 2000.
- 3) 石井秀雄・中村友和・宇多高明・高橋 功・大木康弘・熊田貴之：粗粒材養浜による砂浜の安定化に関する現地実験，海岸工学論文集，第53巻，pp. 681-685, 2006.
- 4) 宇多高明・木下幸夫・山野 巧・吉岡 敦・三波俊郎・荻岐信二・石川仁憲：長期深淺測量データに基づく湘南海岸の海浜変形の実態分析，海岸工学論文集，第53巻，pp. 651-655, 2006.
- 5) 宇多高明：「海岸侵食の実態と解決策」，山海堂，p. 304, 2004.
- 6) 野志保仁・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之：局所勾配算定式の適用範囲と底質特性の新しい評価指標，海岸工学論文集，第52巻，pp. 406-410, 2005.
- 7) 福濱方哉・山本幸次・宇多高明・芹沢真澄・石川仁憲：混合粒径砂を用いた大型水路実験による縦断形変化の再現と予測，海岸工学論文集，第53巻，pp. 446-450, 2006.
- 8) 目黒嗣樹・山本幸次・福濱方哉：平衡海浜の形成過程と養浜材の粒径に関する研究，海岸工学論文集，第52

地母片に起る、母片を移る程数を積み重ねることから最も理解が促進される方法である。

ある養浜材料の適用範囲を調べる、母片工子調文集、第50巻，pp. 596-600, 2003.