侵食対策としてのヘッドランドの効用と限界

宇多 高明¹・五十嵐 竜行²・大谷 靖郎²・大木 康弘³

¹正会員 一般財団法人土木研究センター常務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 タカラビル)

E-mail: uda@pwrc.or.jp

²正会員 一般財団法人土木研究センター (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4 タカラビル)

E-mail: kenkyu1@pwrc.or.jp

³一般財団法人土木研究センター (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4 タカラビル)

ヘッドランド(HL)は沿岸漂砂の阻止を目的として造られてきた。しかし細砂海岸での事例によれば、HLの先端水深を波による地形変化の限界水深より大きくできないことが多いため沿岸漂砂の一部がHLの下手側へと流出し、当初のHLを伸ばせば安定海浜が形成されとの説明との乖離が大きくなっている。また、HLの最終建設段階で横堤が伸ばされた結果、HL間の中央部で侵食をもたらす事例が多い。本研究ではこのような侵食対策としてのHLの効用と限界について論じ、今後の方策について考察した。

Key Words : Artificial headland, longshore sand transport, n-line model, Ichinomiya coast

1. はじめに

「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」¹⁾では、突堤に関して以下の記述がなされている。すなわち、「海岸侵食は、漂砂の収支バランスが崩れたために生じる現象であり、突堤により沿岸漂砂量を減少させ、流入漂砂量と流出漂砂量を均衡させることにより侵食の軽減および海浜の維持・安定化が可能である」。そして突堤周辺の汀線変化は図-1のようであるとしている。ヘッドランド(artificial headland, 以下HLと略)も図-1に示す突堤周辺の汀線変化をイメージして開発された施設であって、茨城県の鹿島灘海岸、千葉県の新里浜など全国各地で造られてきている。ここでは新里浜を実例としてHL工法の効用と限界について考えてみる。まず、新里浜のように海浜砂が粒径0.2 mm程度の細砂により構成された海浜では、HLを波による地形変化の限界水深 h_c (わが国の外海・外洋に面した海岸ではほぼ10 m程度)より深い場所まで伸ばすことは、建設に多大なコストを要すること、またHL自体が大きな波の遮蔽域を形成して周辺海浜へ大きな影響を及ぼすことなどから実際問題不可能と考えられる。その場合、HLの先端水深を h_0 とすると、砂移動は h_c 以浅の水深帯で起きているので、 $h_0 \sim h_c$ 間ではHLの先端を沿岸漂砂が回り込んで下手海岸へと流出し、HL上手側の海浜に堆積している砂量は減少せざるを得ない。HLは沿岸漂砂の阻止を目的に造る以上、このことはHLの効用が失われることを意味するが、既往研究では

これらの点について十分な説明が行われていない。また、HL建設の最終段階において横堤を伸ばすことにより中央部海浜の侵食が引き起こされる事例も数多く、現場で問題となっている。本研究では、とくに計算結果や実測データ自体の提示よりむしろ、過去から行われてきたHL工法の効果に関する説明が、当初説明されてきたものと相違し、現場では説明に窮する事態が起きていることを中心に述べた上で、対応策について考察した。具体的には、新里浜のような緩勾配海浜を対象とした等深線変化モデルによる検討²⁾と、一宮海岸に造られたHL周辺の汀線変化の実測データ³⁾などを基に考察した。

2. 一様勾配の細砂海浜におけるHL周辺の地形変化予測

宇多ら²⁾は、芹沢ら⁴⁾の等深線変化モデルを用い、図-2に示すようにHLの縦堤・横堤の長さを種々変えた場合の細砂海岸におけるHLの効果について検討した。この結果

図-1 突堤による海浜の安定化¹⁾

図-2 HLの縦堤・横堤長の組み合わせ（計算ケース）²⁾

を参照して考える。計算は、初期地形を直線平行等深線で与え、そこに波が 12° をなして斜め入射する条件が設定された。 h_c は9m、バーム高 h_{RL} は3mとし、沿岸漂砂量が7万 m^3/yr で与えられる動的平衡状態を造り出した。その場合砂の平衡勾配は1/50とされた。

図-3は、200 mの縦堤を設置したケース1の等深線形状の変化を示す。左向きの沿岸漂砂がHLの縦堤により阻止されるため、HLの上手側では等深線が前進し、下手側では後退している。HL沖では上手側で等深線が突出し、HLの先端のすぐ下手側では等深線が大きく蛇行することになる。このようなHL沖での等深線の蛇行こそHL沖を沿岸漂砂が回り込んでいる証拠となる。HLの規模を大きくし、横堤を造ったケース6でも等深線の基本的変化パターンには変化がない（図-4）。

図-5は長さ200 mの縦堤のみ（ケース1）、横堤を200 mとして縦堤長を100 m、200 mとしたケース5、6でのHL沖の通過沿岸漂砂量 Q_0 の変化を示す。 Q_0 は初期にはいずれのケースでも小さく、HLは沿岸漂砂を効果的に止めているが、時間経過とともにHLの先端水深が浅くなると Q_0 は次第に増加していく。このようにHLの沿岸漂砂阻止能力は時間の関数となり、また、HLによる沿岸漂砂の低減効果は縦堤が長いほど高くなる。一方、横堤による沿岸漂砂の阻止効果は縦堤の場合より小さい。さらに横堤を伸ばしても時間とともに阻止効果は低下し、HL沖の通過沿岸漂砂量は時間とともに増大するという結果となる。

図-6には縦堤長を200 mの一定に保った上で横堤を伸ばした場合のHL沖の Q_0 の変化を示す。横堤長は0 m（ケース1）、100 m（ケース4）、200 m（ケース6）である。横堤を伸ばすほど Q_0 は減少するが、いずれのケースでもHL沖での通過沿岸漂砂量は時間とともに増加し、最終的には砂はHLの下手側へと流出することとなる。このことは、HLを造っても究極的には海浜の維持はできず、ただ侵食速度を遅くする効果しか期待できないことになる。これはHL工法を現場に最初に導入する際になされた「安定海浜の創出」の説明と矛盾する結果をもたらす。

図-3 200 mの縦堤を設置したケース1の等深線形状の変化²⁾

図-4 HLの規模を大きくして横堤を造ったケース6の等深線形状の変化²⁾

図-5 ヘッドランド形状によるHL沖の通過沿岸漂砂量 Q_0 の変化²⁾

図-6 縦堤200 mの場合の横堤長によるHL沖の通過沿岸漂砂量 Q_0 の変化²⁾

図-7 一宮海岸の2004, 2010年の深浅図³⁾

3. 一宮海岸の実測データに基づく HL 周辺の汀線変化の特徴

(1) 一宮海岸全域の深浅図の比較

九十九里浜南部の一宮海岸では10基のHLが造られてきている。一宮海岸全体の2004年と2010年の深浅図を図-7に示す。HLは縦堤および横堤の一部が伸ばされている。図-7によるといずれの時期においても、2～5号堤ではHLの沖合において等深線の蛇行が起きている。これは前節で述べた等深線変化モデルによる検討で明らかにした現象と考えられる。ただし宇多ら²⁾は一方向の沿岸漂砂が卓越する場での検討結果であったが、一宮海岸では波向が季節的に大きく変動する特徴があるので、HL沖の等深線の蛇行状況が南北で対称形となっていると推定される。このようなHL沖で等深線の蛇行現象が生じている点より、一宮海岸の既設の10基のHLでは沿岸漂砂の一部はその先端を回り込んで流出しており、土砂供給がないため全体的に侵食傾向の海岸となっている。

(2) 片側にのみ横堤が伸ばされた場合の汀線形状

宇多ら³⁾ではHLの片側、もしくは両側に横堤が伸ばされた場合の汀線変化の特徴を調べた。例えば、図-8は5,6号堤間の2010年の空中写真と、1947～2010年の汀線変化を示す。5,6号堤間では、横堤を有する5号堤の付け根では5,6号堤間の平均汀線位置(-50m)を基準として88mの汀線前進が起きている。5,6号堤の縦堤長は

図-8 一宮海岸の5,6号HL間の汀線変化(1947～2010年)³⁾

200 m、横堤長は65 mである。これより長さ200 mの縦堤に65 mの横堤を伸ばした場合、平均値としてHLの付け根では平均汀線位置より88 mの汀線前進が起こることが分かる。HL間の砂の量が一定であればHLの横堤が延ばされた分に応じてHL近傍では汀線が著しく前進する一方でHL間の中央部では汀線が後退することになる。

(3) 両端のHLが完成形とされた場合の汀線変化

両端のHLが完成しているのは2,3号堤である。図-9は2,3号堤間の2010年の空中写真と、1947～2010年の汀線変化を示す。両側に横堤が伸ばされたため両端部の汀線が急激に立ち上がっている。汀線前進量は平均汀線

図-9 一宮海岸の2,3号HL間の
汀線変化(1947~2010年)³⁾

を基準として2号堤では133 m, 3号堤では71 mであって, 対称形ではなく北側の2号堤側の汀線前進量が大きい。また2号堤背後の汀線前進量が大きいことと対応し, HL間での汀線後退量は2号堤に近い $x=0.3$ kmで38 mの最大後退量が現れている。HL間の片側に横堤が伸ばされた場合と考え合わせると, HL間の砂の量がほぼ一定の条件では, HLの横堤を延ばすとそれに応じてHL間の中央部汀線が後退することになる。すなわち横堤の建設は, 波の遮蔽効果を通じてHL間の汀線曲率を増大させる結果をもたらし, 横堤背後での過剰な堆砂とHL間での汀線後退を招くことが明らかである。

2,3号堤の横堤は既に完成形を有する。これらのHLは1990年以降建設が進められ, 2000年までは縦堤が伸ばされたのみであったが, 2005年までには横堤も延ばされ2010年の完成形と同形となった。したがって1990, 2000年の写真では縦堤のみ, 2005, 2010年の写真では横堤も延ばされて完成形となった状態での汀線変化を調べることができる。そしてHLの形状変化に応じて汀線変化が起こるのであれば, 空間的变化と時間的变化から得られた特徴は一致するはずである。そこで以下では2,3号堤の建設に伴う周辺の汀線の時間的变化過程を調べた。図-10には5時期の汀線変化を示す。いずれも自然状態にあった1947年基準の汀線変化量を求めて表示した。図-10によれば, 横堤がなかった1990, 2000年にはHL間の汀線は直線状であったが, 横堤が伸び始めた2005年以降, HL付け根部分での汀線前進が始まった。この汀線変化に見られるように, 侵食によって浜幅が減少した海浜においてHLの横堤を造ると, HL間の中央部の浜幅を大きく狭め, 防護レベルの低下や海浜利用への阻害要因となる。なお, 2,3号堤間では2008-2010年に総量約7万 m^3 の養浜が実施されている。

通常HLの建設では, まず縦堤が, 次に横堤が伸ばされるが, 縦堤を段階的に伸ばしている間にも沿岸漂砂の

図-10 一宮海岸の2,3号HL間の汀線の
時間的变化³⁾

流出が続くので, 結果的に浜幅が狭くなった時期に横堤が伸ばされることが多くなる。このことから, 横堤の長さは, 海浜変形の進行との関連において検討し, 海浜中央部でこれらの障害を引き起こさない長さとする必要がある。あるいは養浜によって海浜中央部の汀線後退を緩和することが必ず必要となる。

4. 考察

(1) HL沖での漂砂の回り込み機構

等深線変化モデルは, 芹沢ら⁴⁾に示されているように二つの原理に基づいて構築されている。第一は, 各等深線(汀線含む)が波の入射方向と直角になった状態で安定化するというものである。第二は, 海浜を縦断方向に見たとき, 砂の粒径に依存した平衡勾配($\tan\beta_c$)と局所勾配($\tan\beta$)の大小関係が重要で, $\tan\beta$ が $\tan\beta_c$ より大きければ(小さければ)沖向き(岸向き)漂砂が起こり, $\tan\beta$ と $\tan\beta_c$ が等しくなるまで砂移動が起こるが, $\tan\beta$ が $\tan\beta_c$ と等しくなれば砂移動はなくなり縦断形は安定するという原理である(図-11参照)。この原理に基づき図-3に示したHL周辺の漂砂について, 現象の理解を促進するために図-12の模式図を参照して考える。

HLの上手(右)側において水深 h_1, h_2 の等深線を考え, これらの等深線間の岸沖距離を L とし, 岸側の等深線が a だけ前進する条件を考える。この場合, 海浜変形が起こる前に縦断勾配が平衡勾配に等しかったとするならば, 変形前後で次の式が成立する。

$$\tan\beta_c = (h_2 - h_1)/L \quad (1)$$

$$\tan\beta = (h_2 - h_1)/(L - a) \quad (2)$$

図-11 海浜縦断形の安定化機構⁵⁾

図-12 HL 上手・下手での沖向き・岸向き漂砂の発生

式(1), (2)より h_1, h_2 を消去すると

$$\tan \beta = L / (L - a) \tan \beta_c \quad (3)$$

となり, HL の上手側では縦断勾配が急になり, 結果として沖向き漂砂が起こる. 全く同様にして HL の下手 (左) 側では式(4)のように局所勾配が緩くなり, 結果として岸向き漂砂が生じる.

$$\tan \beta = L / (L + a) \tan \beta_c \quad (4)$$

これらは HL 沖を境に HL の上手側では砂が溜まり, 下手側では砂が減少するような変化であるため, 砂の連続条件から図-12 に示すように HL 沖での漂砂の回り込みが生じることになる.

(2) HL の先端水深と h_c の関係から見た漂砂の回り込み

HL の漂砂機構について, 波による地形変化の限界水深 h_c と HL の先端水深 h_0 の関係として考えてみる. 既に述べたように, h_c は外海・外洋に面した海岸にあっては 10m 程度の値を有している. 侵食海岸での対策を考えると, 内湾は別として HL の先端水深 h_0 は経済・環境の理由から h_c より必ず小さくなる. 例えば, 上述の一宮海岸

図-13 HL 沖または HL の陸側端での沿岸漂砂の回り込み機構の模式図

図-14 HL と粗粒材養浜

では h_c がほぼ 6, 7 m であるのに対し, h_0 は 3 m 程度と浅い. この程度の先端水深であっても縦堤の長さは 200 m に及び, それを建設するには長い時間と経費を必要とする. この場合, 図-13 のように HL の先端水深 h_0 から水深 h_c までの海底面では砂移動が生じていることから, 沿岸漂砂の一部が HL の先端を回り込んで下手側へと流れ出る. すなわち HL 間に堆積している砂量の減少が起こる. 侵食対策のために HL を伸ばし砂の流出を防止しようとするが, 実際には HL の上手側で徐々に堆砂が進み, 汀線が前進するに従い図-12 の原理でさらに砂の流出が増大することになる. HL がない場合より沿岸漂砂量を低減させることはできるので, 侵食速度の軽減にはなるが, 砂の流出を完全に抑制するものではないので長期的に見れば徐々に侵食が続くことになる.

一般に, 侵食対策として HL 工法を導入する場合, 「HL を建設すれば安定な砂浜を形成させることができる」との説明が行われてきているが, 上記の結果は, 当初段階の説明が現実には達成不可能で, 漂砂供給が十分でない海岸では養浜を継続的に続けなければならず, 海岸の保全のための継続的維持管理がなくてはじめて海岸保全が可能となることを意味する. しかし維持的作業にかかる経費を無駄と見, 施設を造ることにより海岸を保全できるとするわが国の海岸に係る技術では問題の解決は不可能となる. また, 多くの現場では侵食対策としての HL 導入当初の説明と現実との間で乖離が生じるために, 受益者との間で相互不信を招く一因となる.

(3) HL 上手側に安定した砂浜を創出するための粗粒材養浜の原理

図-14 の模式図のように h_0 が h_c より小さい HL では沿岸漂砂の回り込みが起こる. このことは十分長い時間が経過すると建設された HL の効用が失われ, 侵食が進んでしまうことを意味する. このような海岸では侵食対策のために別の手段も必要となる. 第一案は, HL の先端を回り込んで下手方向へと失われるのと同じ量の砂を HL

の上手側海浜に投入することである(養浜)。この場合、HLはその長さに応じて沿岸漂砂の低減が可能になるので、HLは養浜量の低減に役立つ。第二案は、図-14に示すようにHLの上手側に現地海浜の勾配($\tan\beta_1$)より急な勾配($\tan\beta_2$) ($\tan\beta_2 \geq \tan\beta_1$)で安定的に堆積可能な粒径の大きな材料(粗粒材)を投入し、既設HLの先端より陸側で堆積させることである。この場合、投入砂礫はHL間に堆積することが可能となる。ただし、細砂でできた海浜において粗粒材を投入することは、魚介類や海浜を利用する生物に対し影響を及ぼすと考えられるので、このような策を導入する際には環境影響について十分検討することが求められる。

5. まとめ

細砂海岸において侵食が起きた場合、侵食対策としてHLを伸ばしても結局のところ長期的に見れば細砂の流出が続くので、侵食対策としてのHLは時間とともにその効用が低減する。これは単にHLだけでなく離岸堤などの施設においても同じ結果となる。細砂海浜の維持のためには、各種施設を造ってもあまり効果的でなく、流出砂量に匹敵する量の砂を半永久的に投入する以外方法がないことになる。これは細砂海浜で行われてきた侵食対策では究極的には養浜を永遠に続けない限り海岸保全ができないことを意味する。これこそ各地で行われてきた、あるいは現に行われている施設中心の侵食対策の限界を示している。一般に、侵食はその海岸への供給砂量よりその海岸から抜け出ていく漂砂量が多いことに起因して起こるが、その「対策」のためHLを設置し、海浜をほぼ安定化させるという説明が従来から行われてきた。しかし現実にはこれが実現できないとなれば、HLの建設にあ

たって過去になされた説明に間違いがあったことになる。しかし現場では説明を翻すこともできず、効果が十分でないと認識してもなお当初の計画に従って工事を進めなければならない。その場合、沿岸漂砂の供給が十分でない海岸はいずれ侵食され切った状態に近づいていくので、砂浜を保全するためには諸外国で広範に行われている養浜をより重視せざるを得ないと考えられる。

一方、粗砂や礫からなる海岸では平衡勾配が大きく、砂礫は急勾配で堆積しつつ移動することから、HLのように海岸線から構造物を伸ばした場合、高い漂砂制御効果が期待できる。このように海浜の構成材料によりHLの効用は大きく変わるものであるが、現在の計画論ではHLの平面形が注目されることはあっても対象海岸での底質の水深方向分布や局所海底勾配などのデータを取り入れた設計法が十分確立していない。今後はこれらについて検討することが求められている。

参考文献

- 1) 海岸保全施設技術研究会編：「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」, pp.3-77- 3-78, 2004.
- 2) 宇多高明, 渡辺宗介, 古池 鋼, 星上幸良, 長山英樹：ヘッドランドの規模の相違が海浜変形と通過沿岸漂砂量に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.566-570, 2008.
- 3) 宇多高明, 熊田貴之, 清水達也, 富澤和雄, 川瀬 栄, 今村康士：南九十九里浜一宮海岸のヘッドランド周辺の地形特性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp.I_1224-I_1229, 2011.
- 4) 芹沢真澄, 宇多高明, 三波俊郎, 古池 鋼, 熊田貴之：海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.496-500, 2002.
- 5) 芹沢真澄, 宇多高明, 三波俊郎, 古池 鋼：等深線変化モデルの拡張による x-y メッシュ上の水深変化の計算法, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.476-480, 2003.

EFFECT AND LIMITATION OF ARTIFICIAL HEADLAND AS A MEASURE AGAINST EROSION

Takaaki UDA, Tatsuyuki IGARASHI, Yasuro OHTANI and Yasuhiro OOKI

Artificial headlands (HLs) have been constructed to reduce longshore sand transport. However, part of longshore sand transport could be transported downcoast turning around the tip of the HLs, because the tip depth is generally smaller than the depth of closure when HLs are constructed on exposed beaches. This often causes discrepancy between the previous explanation of the formation of a stable beach using the HLs and the reality of the eroded beach. Furthermore, the extension of the head part of the headlands at the final stage of the construction often causes beach erosion at the central part of the pocket beach surrounded by the HLs. These effect and limitations of the HLs were discussed.