竜洋海岸の離岸堤周辺で近年起こりつつある海浜変形モードの変化 Mode Shift of Beach Changes Recently Occurring around Detached Breakwaters on Ryuyo Coast

宇多高明¹・三波俊郎²・石川仁憲³・白石慎重⁴・佐藤純一郎⁵

Takaaki UDA, Toshiro SAN-NAMI, Toshinori ISHIKAWA, Norifusa SHIRAISHI and Jun-ichiro SATO

The beach topography around the detached breakwaters of the Ryuyo coast located immediately east of the Tenryu River mouth was observed to investigate the beach changes. On the basis of the aerial photographs and bathymetric survey data taken since 2007, beach changes in the area between the detached breakwaters and the river mouth were analyzed. 5m³ of color sand was placed at the shoreline and subsequent dispersion of the color sand along the shoreline was measured. The detached breakwaters were found to be the solid boundary at present, although eastward longshore sand transport existed in the past, because of decrease in sand supply from the river mouth.

1. はじめに

天竜川河口左岸に位置する竜洋海岸では、天竜川からの流下土砂が東向きの沿岸漂砂によって運ばれる条件下にあったが、1980年代以降天竜川からの供給土砂量の減少に伴って汀線が後退し、1992年には80m、1994年には125mにわたって護岸が壊れた。このため、対策として1995年までに5基の離岸堤が造られた(図-1参照)。これらの離岸堤は東向きの沿岸漂砂を阻止したために、離岸堤の東側直近の汀線後退を招いた。この地区には保安林の堤防があるため、浜幅が狭くなった場所では堤防の表のり面が露出し、被災の危険が高まった。このことから、離岸堤群により阻止された東向き沿岸漂砂を離岸堤の天端高を下げることににより下手側へ流す方策について検討が進められた(宇多ら、2008)。しかし実際には、天竜川からの土砂供給量が激減している現在、竜洋海岸の離岸堤付近で現在もなお東向きの沿岸漂砂が卓越しているかどうかは不明であった。このことから、本研究では2007年以降の空中写真、深浅測量データを基に離岸堤周辺での地形変化を分析するとともに、離岸堤群の両端付近でカラーサンド(中砂5m³)を投入し、汀線に沿うトレーサーの広がりを調べて漂砂特性を把握した。

2. 竜洋海岸の波浪条件と天竜川の流量

図-2には竜洋海岸沖で行われている波浪観測データより2007年1月から2011年1月までの観測結果($H_{1/3}$, $T_{1/3}$)を示す。同時に、同じ期間における天竜川での洪水の発

生状況について、河口の上流3.3kmに位置する掛塚観測所における流量の経時変化も示す。この間、規模の大きな洪水は2回(2007年7月15日13時の5,532m³と2010年7月15日2時の3,642m³)発生している。このうち2007年7月15日の水位は観測史上既往最高水位を記録し、洪水流量は8,055m³/s(鹿島観測所:河口から25km地点)と天竜川の計画高水流量14,000m³/sの6割の規模であった。これら以外では規模の大きな洪水は発生していない。

3. 空中写真判読による海浜地形変化の把握

調査対象区域は、天竜川河口左岸から福田漁港まで続く9.5kmの海岸線のうち、図-1に矩形で示す沿岸方向に5.7kmの区域である。この矩形区域における2007年以降の拡大空中写真を図-3に示す。対象区域の中央には離岸堤群がある。また、離岸堤群の東1.2kmには6号離岸堤が2009年以降建設中である(図-3の矢印)。なお、離岸堤については天竜川河口側から1, 2号と呼んで区別する。2007年では、天竜川河口には右岸側から細長い河口砂州が伸びており、開口部はほぼ左岸付近にあった。以後、2011年に至るまで右岸河口砂州は恒常的に右岸側から細長く伸びている。また、左岸河口砂州は右岸砂州と比べてその幅が広く、図示する測線Aでの浜幅は230mと広かった。また、左岸河口砂州の突出部分から離岸堤群までは緩やかに湾曲した汀線が伸びており、とくに西端の1号堤の西隣では汀線が離岸堤に滑らかに接していたのに対し、5号堤の東側では汀線が大きく後退し、フック状となっていた。このことから2007年当時、竜洋海岸では東向きの沿岸漂砂が卓越していたことが分かる。

2008年では、2007年と比較して測線Aでの浜幅が155mまで減少したが、同時に右岸河口砂州が2007年と比べて左岸砂州より沖に突出しているのが特徴的であって、右岸砂州の先端が沖合まで伸びている場合には左岸砂州の幅が狭いという相関関係が見られる。また、2008年で

1 正会員	工博	(一般財団)土木研究センター常務理事 なぎ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
2		海岸研究室(有)
3 正会員	工修	(一般財団)土木研究センターなぎさ総合研究室
4		静岡県袋井土木事務所 企画検査課
5		静岡県交通基盤部 河川海岸整備課

図-1 天竜川～福田漁港の空中写真 (2011年)

(a) 竜洋波浪観測所における有義波高・周期

(b) 鹿島観測所 (25km)における日流量

図-2 竜洋海岸沖での波浪観測データと掛塚観測所における天竜川の流量変化

は河口左岸から離岸堤群へと汀線が直線状に伸びており、離岸堤群の位置では平均汀線は離岸堤と平行に伸びていた。しかし東端の5号離岸堤の東側で汀線がフック状に後退する点には変化がない。

2009年になると、A点の東側の砂州の膨らみが消失して汀線が直線的になった。また、右岸砂州が2008年と比較して後退したと同時に、A点での浜幅が185mまで増加した。一方、離岸堤周辺では、1号堤西端の汀線がわずかに後退している。さらに、河口が東側へ移ると同時に、河口流が斜め東向きに流出している。

2010年では、2009年と比較して右岸砂州が2007年当時とほぼ同じ位置まで後退したが、これと同期して左岸砂州はA点付近で大きく膨らみ、浜幅が195mまで回復した。2011年になると、2010年と比較して1号堤の西側直近の汀線が後退してフック状となると同時に、天竜川河口では東側から砂嘴が伸びて河口流の方向が西側へと振れている。また、この時期には各離岸堤の開口部の汀線が局所的に後退してはいるが、5号堤を除いて離岸堤背後は全面的に砂で満たされている。なお、2010年と2011年の矢印位置には撤去されたブロックを用いて6号離岸堤が建設され、2011年には長さが28.8mとなったため、その西側の汀線が東側汀線よりわずかに前進している。

2007～2011年に撮影された垂直写真と同一時刻に撮影された5組の斜め空中写真より、左岸河口砂州の変化について調べた (図-4)。2007年には幅広い左岸砂州が発

(a) 2007年

(b) 2008年

(c) 2009年

(d) 2010年

(e) 2011年

図-3 竜洋海岸の空中写真 (2007～2011年)

達していたが、2008年には河口左岸が著しく侵食され、砂州幅が狭まった。この理由は、2007年7月15日に最大流量8,055m³/sの洪水が起き、これによって左岸砂州がフラッシュされたためである。一方、図-4 (b) は洪水後7ヶ月に撮影されたため、この間河口の汀線に沿って上流へ遡る沿岸漂砂が生じ、河道内には矢印aで示す小規模な砂嘴が伸びた。しかし、2009年には、2008年当時見られた小規模な砂嘴は河川流により侵食されて直線的な流路となり、2008年には侵食により残された砂州の沖合の平坦面に大量の砂が堆積し、左岸河口砂州が大きく膨らんだ。2010年には、左岸砂州の発達が続く、再び2007年当時の砂州に近い状態まで砂州幅が増した。2010年から2011年までの変化では図-2に示したように2010年7月15日に洪水が発生したため大きく膨らんだ左岸河口砂州がいったん侵食され、その後河口へと漂砂が逆流して中央

図-4 竜洋海岸の斜め空中写真（垂直写真と同一時刻に撮影）

部に lagoon を囲む砂州が再び発達したことが分かる。

4. 竜洋海岸の汀線と浜幅の変化

竜洋海岸の長期的変化について調べるために、1962年基準での2011年までの汀線変化を図-5に示す。長期的に見ると離岸堤群位置では汀線が平均25m前進しているが、離岸堤群の両側では汀線が後退傾向にある。離岸堤群の東側においては、福田漁港近傍の $X=9\sim 11\text{km}$ では1995年以降汀線は安定しているが、 $X=11.2\sim 14.8\text{km}$ では汀線後退が著しい。このように離岸堤群の東側では広域で汀線が後退してきたのに対し、西側でも $X=16.2\text{km}$ 付近を中心とした汀線後退が起きている。図-6は、2008年基準での2009～2011年の汀線変化を示す。2008年基準では離岸堤群位置での汀線変化は見られないが、離岸堤群の両端では2009、2010、2011年の順に汀線が単調に後退してきたことが分かる。一方、天竜川河口左岸では、離岸堤西端の汀線変化と逆モードを示して汀線が前進している。このように離岸堤～河口間の汀線変化は、沿岸漂砂の方向が西向きであることを強く示唆する。しかし、このような西向きの沿岸漂砂が竜洋海岸全体で起きたのであれば、離岸堤群の東側でも同種の汀線変化が起こるべきであるが、実際はそれと逆である。 $X=13.6\text{km}$ に設置された6号堤と離岸堤群の間の汀線変化は、東向きの沿岸漂砂に起因するものとなっている。

浜幅の分布を図-7に示す。1995年当時、既に離岸堤群の工事が始められていた。当時、離岸堤群の東側直近の

図-5 竜洋海岸の汀線変化（1962年基準）

図-6 竜洋海岸の汀線変化（2008年基準）

図-7 竜洋海岸の汀線変化（1962年基準）

$X=14.2\sim 14.8\text{km}$ では汀線が局所的に大きく後退してはいたが、 $X=14\text{km}$ 以東ではほぼ100m以上の浜幅があった。2008年までには離岸堤群東端から $X=11\text{km}$ 付近までの約4km区間で汀線が著しく後退し、2011年には $X=14.4\sim 14.7\text{km}$ では浜幅が0となった。浜幅は離岸堤群の東隣で最も狭く、そこから福田漁港へと東側に距離とともに増大するという分布を有している。これに対し、離岸堤部分の汀線は1995年より前進した後、最近ではほぼ平衡状態に達している。離岸堤群の東側における汀線変化のみからは東向きの沿岸漂砂が離岸堤群によって阻止されたため汀線変化が起きたと推定される。東向きの沿岸漂砂が離岸堤群によって阻止されたのであれば、離岸堤群の西端では汀線が前進し、離岸堤の端部を埋めて砂が堆積しなければならない。しかし実際にはこれと逆に汀線が後退している。このことは近年天竜川河口から東向きに連続的に沿岸漂砂が流れる条件ではなくなっていることを意味する。

図-8は、離岸堤群～天竜川河口左岸の汀線変化を示す。天竜川河口左岸では、2007年から2009年にいったん砂州が後退したが、その後2011年まで左岸砂州が発達し、2007年当時の姿とほぼ同一となった。その際、離岸堤群

図-8 天竜川河口左岸の汀線変化

の西側では侵食が進み、 $X=16.4\text{km}$ 付近にある不動点を境に汀線が反時計回りに回転するような汀線変化が起きた。この原因は、洪水により左岸砂州が侵食されてから左岸砂州が再発達する場合、それに必要な砂が東側区域から運び込まれるためと考えられる。その際、離岸堤群が沿岸漂砂の固定境界となって離岸堤群の西側隣接部では汀線が後退したと推定される。

竜洋海岸は河口デルタの一部として発達してきたこと、また図-5に示した離岸堤群の東側での汀線変化を考慮すると、竜洋海岸では過去に東向きの沿岸漂砂が卓越してきたと考えることが妥当である。しかし近年では竜洋海岸では河口部の汀線後退とともに強い東向きの沿岸漂砂は消失し、漂砂量が0に近づいていると考えられ、そのような条件下で、離岸堤群の西側では天竜川河口砂州の変動と連動した地形変化が起きていると推定される。

5. 縦断形変化

対象区域では沿岸方向に250m間隔に並んだ測線上で縦断測量が行われてきた。これらの測線のうち、図-3(e)に示す5測線を選んで縦断形比較を行った(図-9参照)。No.214では2008年に沖合の-5m付近にピークを有するバーが発達していたが、2011年までにバー頂部が削られてトラフが埋まり、その付近で新たにバーが発達した。No.208でも同様な地形変動が見られる。節点に位置するNo.210でも沖合の-5m付近にあったバーが消失している。この間、図-2に示したように2007年には高波浪が作用したためバーが発達したが、その後比較的静穏な波が続いたためバーの規模の縮小と陸向き移動が起きたと推定される。これらの変動と対照的に、No.214では-2m~-2m間で断面が平行移動しつつ前進しているが、No.210では縦断形は一定のままで、さらにNo.208ではほぼ-5m以浅で断面が平行に後退しており、No.214と逆モードの縦断形変化が起きている。断面の前進または後退に合わせて汀線も前進または後退していることから、先に図-8に示した汀線変化はこの縦断形変化に対応することが明らかで、汀線付近の断面形が平行移動するという特徴から、この区間では西向きの沿岸漂砂により地形変化が起きたと推察される。

図-9 縦断形変化

次に、離岸堤群を通るNo.205では、沖合の-5m以深で2008年に形成されていたバーの頂部が削られてそのすぐ岸側のトラフを埋める変化が起きたが、離岸堤周辺での縦断形には変化が見られない。さらに、離岸堤群の東端部に位置するNo.201では、測線では汀線付近が1/8と急勾配で落ち込み急深である。離岸堤群の西側直近のNo.208と、東側直近のNo.201の縦断形を比較すると、離岸堤群の東側のNo.201では-5m以浅の縦断形が凹状であり、侵食されたあとの縦断形を示すのに対し、No.208で

図-10 トレーサー投入地点と汀線に沿うサンプリング地点

図-11 観測期間中の波浪条件（竜洋波浪観測所）

は-5m以浅が凸状であって堆積後の縦断面形となっている。このような縦断面形の相違は、離岸堤群の西側では過去に砂が堆積してきたこと、これに対し離岸堤の東側では侵食を受けて現況の縦断面形となったことを示すと考えられる。すなわち、離岸堤群の西側区域では、長期的には東向き沿岸漂砂の卓越によって縦断面形が形成されてきたものの、近年では縦断面形がほぼ安定状態に達し、そのようにして形成された海浜地形上で、変動としての西向きの沿岸漂砂の作用が重なったと見られる。

6. カラーサンドによる漂砂観測

トレーサー調査では、緑色と青色の中砂それぞれ5m³を離岸堤群の西端から400mのNo.209と、東端から100m東のNo.201に2011年11月22日に投入し、投入後3日後、1、2週間後および1、2ヶ月後に図-10に示すように汀線に沿って4kmの区間でサンプリングを行った。サンプリングは約5kgの試料を採取し、1mm以下に篩分けした上で約2kgの試料に対しカラーサンドの個数を計測した。図-11にはトレーサー調査期間中の波浪条件を示す。観測期間中は $H_{1/3}$ が3m以下で高波浪の襲来はなく、エネルギー平均波高が0.9m、周期5.4sの条件であった。

図-12には離岸堤群西側のNo.209に投入したカラーサンドの広がり状況を示す。カラーサンドは離岸堤間でもごくわずかな個数発見されているが、それらはほとんど無視できる個数であって、離岸堤群西側の投入点周りで発見個数が多い、正規分布に近い分布形を有している。また、2週間後以降は投入点より西側で発見個数が多いことから、離岸堤群の西側では拡散しつつ緩やかに天竜川河口方向へとカラーサンドが移動したことが分かる。これは空中写真や縦断面形変化から推定された沿岸漂砂の方向と一致している。同様に、図-12には、離岸堤群東側のNo.201+150に投入したカラーサンドの拡散状況を示す。カラーサンドは投入点より東側で多く発見されていることから、離岸堤群の東側では依然緩やかに東向きの

図-12 離岸堤西側と東側に投入したカラーサンドの移動状況

沿岸漂砂が生じている。

7. まとめ

空中写真や深浅測量データの分析、および新たに実施したトレーサー調査によれば、竜洋海岸の離岸堤群から天竜川河口左岸砂州の間では、洪水によって砂州のフラッシュが起こった後、離岸堤群側から河口方面へと西向きの沿岸漂砂が起こる条件にある。この沿岸漂砂は、離岸堤群周辺では図-9に示したように-5m以浅の約1/8の急勾配斜面で起きているが、離岸堤群はこの急斜面の中央に設置されているので、この沿岸漂砂を阻止するものとなっている。しかし-5m以深の細砂で覆われパートラフの発達している海底面での砂移動は離岸堤により拘束されずに流れることが可能と考えられる。前浜付近の急勾配斜面は主として粗砂や礫で構成されているが、この部分を移動する粗粒分は、従来のように東向きの沿岸漂砂によって運ばれにくい状態となっている。これより天竜川からの供給土砂量が激減した条件の下で、離岸堤群～河口間での前浜付近に堆積する粗粒分に関しては海浜地形がほぼ安定状態に近づいており、この安定状態に変動が重っていると考えられる。一方、離岸堤群沖では細砂の移動が可能であるし、また離岸堤群の東側では緩やかな東向きの沿岸漂砂が発達しており、これは汀線変化で見られた特徴とよく一致する。以上より、竜洋海岸では離岸堤群があるため粗粒分の移動量はほぼ0と見なすことができものの、離岸堤沖については細砂が通過可能と考えられる。

参考文献

宇多高明・長島郁夫・横山卓司・松浦吉洋・古池 鋼・石川 仁憲 (2008)：静岡県竜洋海岸の海浜変形予測，海岸工学論文集，第55巻，pp.666-670。