

河道におけるタンカーの造る航走波の特性と 離岸堤による河岸防護効果

CHARACTERISTICS OF A WAVE GROUP GENERATED BY A TANKER IN A RIVER
AND EFFECTS OF DETACHED BREAKWATERS AS A BANK EROSION MEASURE

福岡捷二¹・渡邊明英²・細川真也³・泊 宏⁴・京才俊則⁵

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Shinya HOSOKAWA, Hiroshi TOMARI and Shunsoku KYOUSAI

¹フェロ-会員 工博, Ph.D 広島大学大学院工学研究科教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 広島大学大学院工学研究科助教授

³学生会員 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

⁴正会員 工修 国土交通省関東地方整備局荒川下流工事事務所所長

⁵正会員 工博 (財)リバーフロント整備センター研究所長

In urban rivers, groups of large waves are generated when boats like tankers pass. These waves are the main cause of reed covered bank erosion. Reed banks are required in order to protect the riverbank and to provide inhabitant for wildlife. Therefore it is important to clarify a relationship between wave energy and rate of bank erosion. For this purpose, we constructed detached breakwaters in the Arakawa River to protect riverbanks from such waves, and attempted to measure energy dissipation so that boat induced wave effect can be included in the design of bank protection works.

In this paper, the characteristics of a group of waves generated at each passing of a tanker and the effects of energy dissipation of the oncoming waves by detached breakwaters were measured. A relationship between wave energy dissipated by detached breakwaters and rate of bank erosions was also investigated.

Key words: tanker generated wave group, bank erosion, detached breakwater, energy flux, wave direction, wave diffraction

1. 序論

かつて荒川下流域はヨシ原が群生しておりヨシ原群落は魚類や鳥類などの様々な動物の住処としての役割を担ってきた。また、ヨシ原が繁茂する河川は、都市の中で住民が憩える数少ない自然空間として重要な存在であった。しかし、河川改修のための低水路の拡幅による生育面積の減少や、地盤沈下対策として行なった高水敷の盛土により、ヨシ原が生育できる場所が減少した。さらに、近年は舟運が活発となり、タンカー等によって造られる航走波によるヨシ原群落の侵食が目立つようになってきた。そのような背景から、荒川では自然空間としてのヨシ原を再生させることが河川計画の中に盛り込まれている。

航走波の特性に関しては、福岡ら¹⁾が船の種類別に航走波エネルギーの違いを示し、ヨシ原におけるエネルギー減衰率を明らかにしている。また、深水域から浅水域への遷移域において、遷移域の幅 ΔX と船速度から算出される特性波長 L_s より求められる無次元長さ $\Delta X/L_s$

と最大エネルギーフラックスの透過率の関係について検討している。また、ヨシ原による航走波エネルギーの減衰効果についてもすでに明らかにしている²⁾。しかし、航走波エネルギーと裸地河岸・ヨシ原河岸の侵食の関係については未だ述べられていない。

国土交通省荒川下流工事事務所は平成13年4月に航走波によるヨシ原侵食に対する対策として、試験的に4基の離岸堤を設置した。これらの離岸堤の設置の目的は、航走波エネルギーの減衰を評価し、離岸堤の内と外の間の水の流入出や生態系への影響を検討するためである。

本論文では、最初に河岸侵食の主な原因であるタンカーの航走波の特性を現地実験によって調べ、船の種類および船速度と航走波の特性の関係について明らかにする。次に、4基の離岸堤に入射する航走波と離岸堤を透過する波の観測を行ない、透過波のエネルギー分布特性を明らかにする。最後に、施工時から8月現在までに起こった河岸侵食の状況より、離岸堤の天端高、離岸堤間隔および透過波エネルギーの分布と河岸侵食の関係について検討を行ない離岸堤の河岸防護効果を明らかにする。

2. 航走波の特性

航走波の最大波高、最大周期および最大エネルギーフラックスは福岡ら¹⁾が水上バス、プレジャーボートそしてタンカーについて多くのケースを観測することにより明らかにしている。しかし河岸侵食との関連で議論するには、最大波のみではなく、船の航行頻度や一回の航行によって生まれる最大波以外の波がどれくらい河岸に影響を及ぼすかを明らかにする事も重要である。また、航走波による離岸堤背後の河岸侵食位置を考える場合は波向を明らかにする必要がある。

(1) 船の通行頻度

荒川下流工事事務所が平成13年冬に荒川下流域で1日当りの船の通過数を観測した結果を図-1に示す。

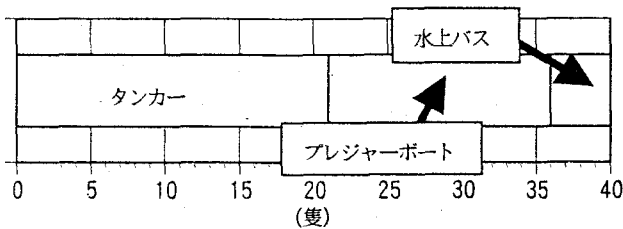


図-1 一日当りの船の通過数

この結果、1日当りの全通過数に対してタンカーが約半分の割合を占めていることが分かる。しかし、タンカーと同様に船の速度によっては大きな航走波を造り出す水上バスの航行頻度はそれ程多くない。以上より、航走波の詳細な解析は主としてタンカーについて行なえば十分である。

(2) タンカーが造る航走波の特性

タンカーの典型的な波群形状を図-2に示す。タンカーが造る航走波の特性は、周期が2.0s~3.0sのまとまった波が一定の波向で河岸に到達する事であると福岡ら¹⁾がすでに述べている。

a) 上り下りの違いによる波高の違い

タンカーの速度と最大波高の関係を図-3に示す。この図より、タンカーの造る波の最大波高は10~50cm程度である事が分かる。また、上りと下りで分類し、同一の船の速度についてみると波高は下りの時よりも上りの時の方が大きいことが分かる。これは、タンカーは上りの時は積荷を積んでいるために喫水が大きくなるが、下りの時には喫水は小さくなるためであると考えられる。

b) 1波群中の航走波の特性

航走波の波高は河岸に伝播する過程において変化する。特に、船から造られた直後の波高変化は著しい。河岸に到達する航走波波群を見積もるためには、船から造られて間もない波群を解析するのではなく、著しい波高変化を経た後の波群を解析する必要がある。ここでは、以上のことを満たすため、タンカーの航路が波高計の設置位置から70m以上離れている場合について解析を行なった。

図-4に、解析結果を波高順位と波高の関係で示した。図-4の全ケースについて見ると、波高順位が10番目以上になると、波高は10cm以下となる。さらに、各ケースは、視覚的に3つのパターンに分類される事が分かる。パターン1は、最大波高が25cm程度であり波高順位が10番目以内でも大きな波高を持っている。パターン2は、最大波高が20cm程度であり最もケース数が多い。パターン3は、最大波高は20cm程度であるが波高順位が低い段階ですでに波高が10cm程度にまでなっているものである。

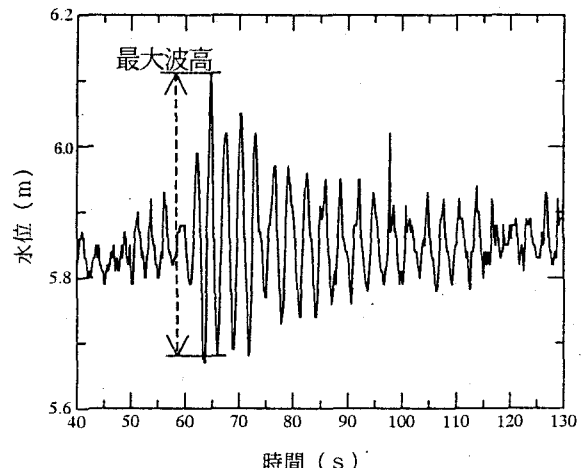


図-2 タンカーの典型的な波群形状

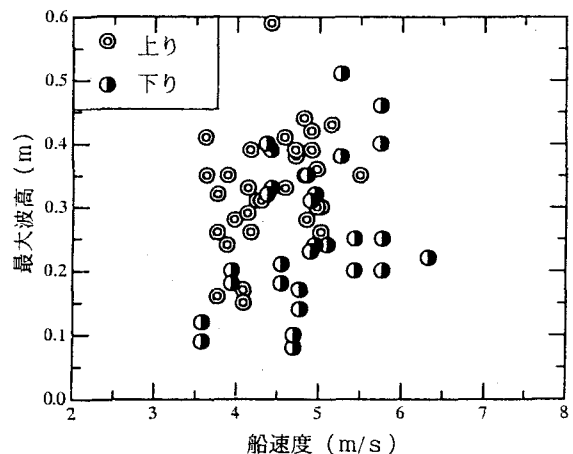


図-3 タンカー最大波高、上り・下り比較

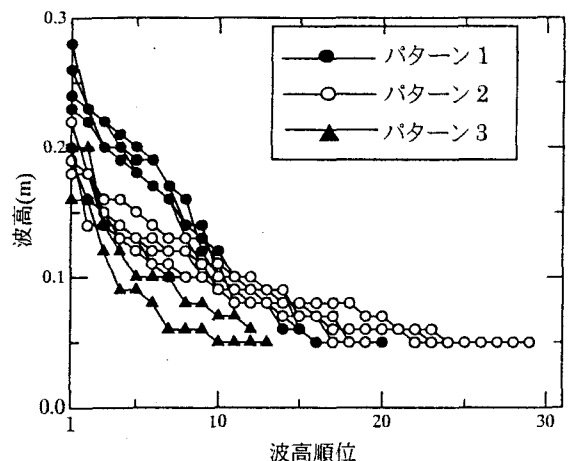


図-4 波高順位と波高の関係

(3) 波向

波向は、図-6中に示す様に、河道横断方向と波の進行方向の成す角度の事であるとする。航走波は同じ波向を持って一気に連続して河岸に伝播する。河道方向に平行な構造物に対して、波が波向を持って入射すると、構造物の背後にも波が伝わる。

一般的に、河道中央付近において河道に対して角度を持って造られる航走波は、河岸に伝播する過程で屈折により、徐々に河道に対して平行に近づこうとする。しかし、本研究で対象とする河道では河床の横断勾配は急であるため、航走波は屈折しきれずにある程度の波向を持って河岸に到達する。波向を決定する主な要因は、船種及び船の速度である。図-5に船種及び船速度と波向の関係を示す。これより波向と船速度及び船種の関係はある程度分かる。タンカーは速度の範囲が狭いにもかかわらず波向は 15° ~ 50° とかなり幅広い値となっている。

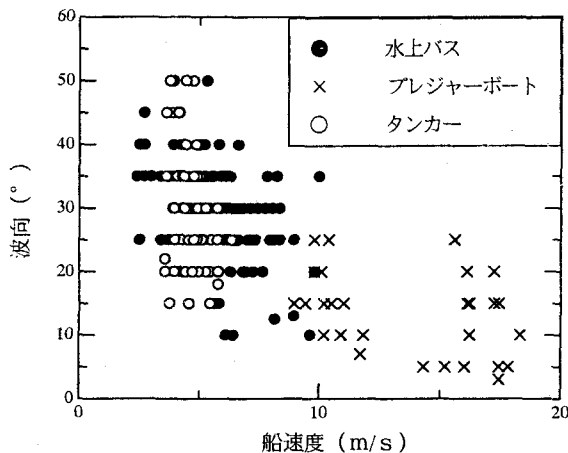


図-5 船の速度と波向の関係

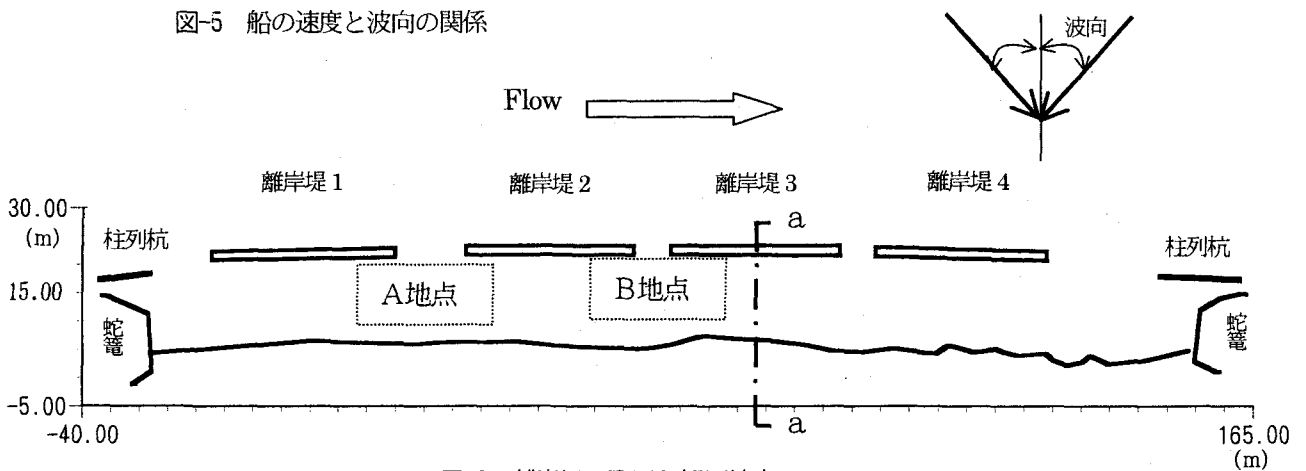


図-6 離岸堤の配置と観測地点

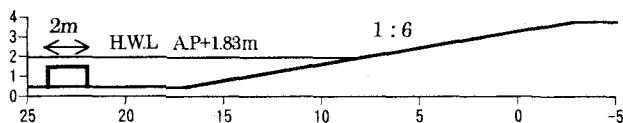


図-7 a-a断面図(離岸堤3)

3. 離岸堤の防護効果

(1) 観測方法

平成13年4月に荒川河口の上流3.75km地点にある小松川自然再生工事区域に航走波による河岸侵食を抑制する目的で離岸堤が施工された。図-6の全体図に示すように離岸堤は河岸にほぼ平行に4基設置してある。離岸堤天端高の違いによるエネルギー減衰効果の違いを明らかにするため、異なった高さの離岸堤を設置した。離岸堤の諸元を表-1に示す。

観測は、それぞれの離岸堤の背後で、乗り越えてくる透過波と2基の離岸堤の間から直接入り込み、離岸堤の背後に広がる回折波を観測した。それぞれの観測方法を以下に示す。

a) 離岸堤上を透過する波の観測

各離岸堤の背後中央に観測者を1人ずつ配置し、離岸堤上を透過してくる航走波の最大値を読み取った。潮位が上がり離岸堤が潜堤の状態になると離岸堤上で碎波が起こるが、エネルギーは透過しているために、離岸堤から2, 3m背後では再び波の形を呈するようになる。この再び波に戻った内の最大波高を透過波高として観測する。

b) 2基の離岸堤の間から進入する波の観測

離岸堤と離岸堤の間から進入する波は図-6中のA地点とB地点で観測した。離岸堤1と2、および2と3、3と4の間隔はそれぞれ12mと6mである。それぞれの地点にはあらかじめ単管を打ち込み、観測位置を固定した。波の回折は、高水敷上のやぐらから離岸堤の背後域をビデオ撮影し、これを解析した。

表-1 各離岸堤の諸元

名称	離岸堤天端高	天端幅	延長
離岸堤1	A. P+2.0m	2.0m	30m
離岸堤2	A. P+1.4m	2.0m	30m
離岸堤3	A. P+1.7m	2.0m	30m
離岸堤4	A. P+1.0m	2.0m	30m

c) 河岸侵食の観測

離岸堤背後の侵食状況は写真撮影を行ない、その結果の解析から求めた。

(2) 結果

a) 離岸堤上を透過する波

荒川下流部は、感潮域のため潮位に伴って水位が大きく変化する水域である。現地実験は、水位がA.P+1.28mからA.P+1.84mの間で行われた。対象とした各離岸堤は、天端高が異なるため、水位によってそれぞれ異なる特徴を示した。離岸堤1は、実験時の最高水位より高いため、常に水面上に出ている状態であった。離岸堤4は、実験時の最低水位より低いため、常に潜堤状態であった。離岸堤2, 3は、水位が低くなるに伴い、水面上に出ている状態から潜堤の状態に遷移した。

今、離岸堤4は常に潜堤であるため、離岸堤4を透過する最大波高 H_4 は入射する波とほぼ変化がないと考える。水位と離岸堤を透過するエネルギーの大きさを評価するため、 H_x と他の3基の離岸堤を透過する波の最大波高 H_x の比を H_x/H_4 とする。 H_x/H_4 と水位との関係を図-8に示す。この結果、 H_x/H_4 は水位に関係なく5割以下であることが分かる。これより、離岸堤が水面上に出ている場合の河岸防護効果が大きい事が明らかである。 H_2/H_4 および H_3/H_4 は、水位によって波高比が変化している。 H_2/H_4 は、水位がA.P+1.54mからA.P+1.62mに変化する時に5割以下から急激に10割程度に増大している。 H_3/H_4 は、A.P+1.8m付近で同様の変化を示す。ここで、 H_2/H_4 および H_3/H_4 が変化する時の水位を離岸堤上の水深に換算すると10cmから15cm程度となる。水深がこの程度以下で波高比が急激に小さくなる理由は、航走波が離岸堤を乗り越えられなくなり、エネルギー損失が大きくなるためである。

b) 2基の離岸堤の間から進入する波

A, B地点における航走波の進入の状況を示すため、ビデオ解析と観測結果より、波峰線および無次元エネルギーフラックスを示した。無次元エネルギーフラックス

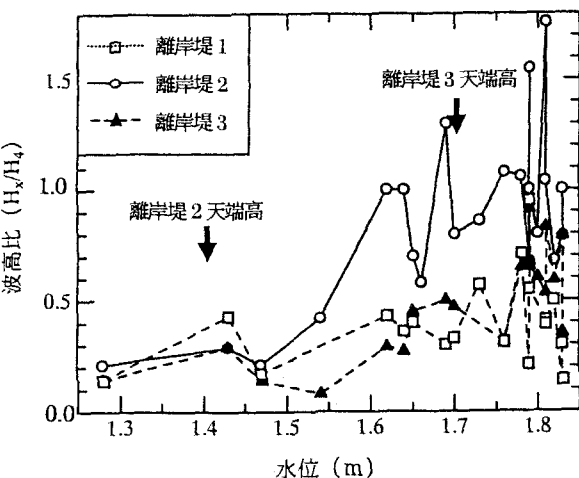


図-8 水位と H_x/H_4 の関係

は、各点のエネルギーフラックス W を図9~11中のa点におけるエネルギーフラックス W_a によって除し、 $W_x=W/W_a$ とする。図-9および図-10はA地点(離岸堤開口幅12m)、図-11はB地点(離岸堤開口幅6m)における結果である。A, B両地点における河岸位置は、離岸堤から約15mである。各ケースの諸元は表-2に示す。

図-9より、河岸防護効果が十分に機能している離岸堤1では、背後のエネルギーフラックスは開口部に比べてかなり小さくなっている事が分かる。一方、離岸堤2は、先述の結果によると、このケースにおける水位では河岸防護効果の機能を有していない。実際に、図-9より、離岸堤2背後のエネルギーフラックスは開口部のエネルギーフラックスとほとんど変化がない事が分かる。さらに、離岸堤2背後のエネルギーフラックスの河道横断方向への変化はあまり大きくない。これらの結果より、片方に河岸防護効果を発揮していない離岸堤を有する開口部の背後河岸は、河岸防護効果を発揮している離岸堤背後河岸を除いて侵食傾向にある事が予想される。

図-10, 図-11より、河岸防護効果を発揮している両離岸堤の背後では、エネルギーフラックスは開口部のエネルギーフラックスと比べてかなり小さくなっている事が分かる。開口部の幅の違いに着目すると、図-11では、開口部から進入したエネルギーフラックスが河岸に到達する過程において、著しく減衰している事が分かる。これは、開口部から進入するエネルギーが小さく、回折によるエネルギー分散の影響が大きくなるためであると考えられる。一方、図-10では、開口部から進入したエネルギーはほとんど減衰せずに河岸に到達している事が分かる。これは、開口部が大きいため進入するエネルギーが大きくなり、回折によるエネルギーの分散の影響が小さくなったためであると考えられる。

表-2 各ケースの諸元

図番号	ケース	針路方向	水位	最大波高	波向
9	case1	上流向き	A.P+1.84m	13cm	30°
10	case2	上流向き	A.P+1.40m	31cm	20°
11	case3	上流向き	A.P+1.40m	38cm	20°

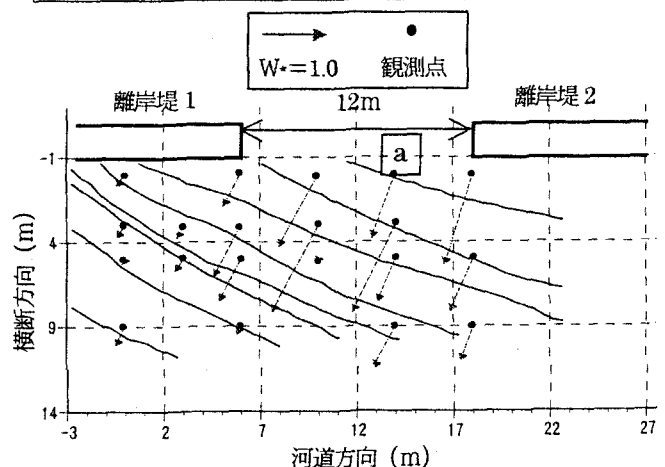


図-9 case1

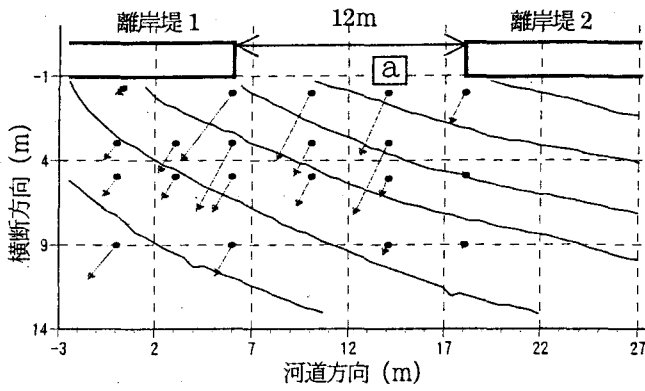


図-10 case2

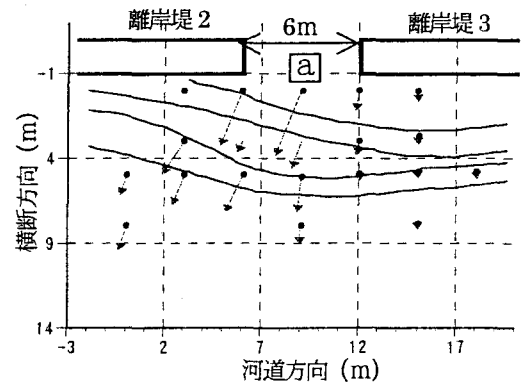


図-11 case3

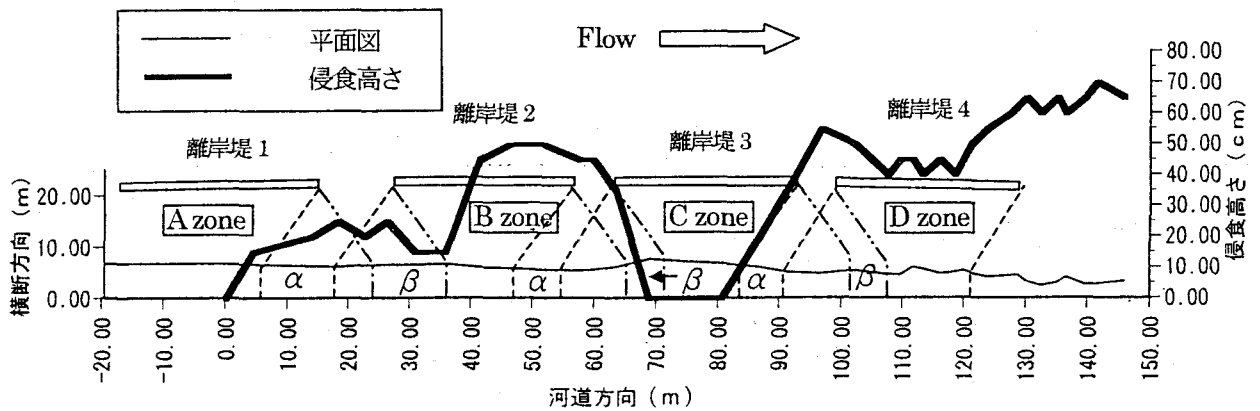


図-12 河岸侵食状況

c) 河岸侵食状況から見た離岸堤効果

図-12 に小松川自然再生工地区の平面図上に離岸堤の配置、および現在の河岸侵食高さの状況を示す。河岸侵食高さを図-13 のように定義した。河岸侵食は平成13年4月の完成から8月までの4ヶ月で起こったものである。

離岸堤の高さおよび2基の離岸堤間隔の河岸侵食に及ぼす影響を明確にするため、タンカーの波向を30°と仮定して図中に点線および2点破線で離岸堤の端から波向線を描いた。ここでは離岸堤背後で航走波は回折を起こさず、直線的に進入すると仮定している。離岸堤1、離岸堤2、離岸堤3、離岸堤4の背後をそれぞれA-zone、B-zone、C-zone、D-zoneと分類する。船が下流から上流に向かう場合、航走波が2基の離岸堤の間から入り込む領域をαとし、逆に船が上流から下流に向かう場合、2基の離岸堤の間から入り込む領域をβとした。離岸堤1背後で船が下流から上流に向かう場合にαの領域に分類されるが、上流から下流の時にαにもβにも分類されない領域をA-αと表記し、全領域について同様の分類を行なった。領域と最大侵食高さの関係をまとめたものを表-3に示す。

この結果、AとCは他の領域に比してほとんど侵食を起こしていない。Aの最大侵食高さは15cmとなっているが、これはタンカーの波向を30°と過小に定義しているためであると考えられる。

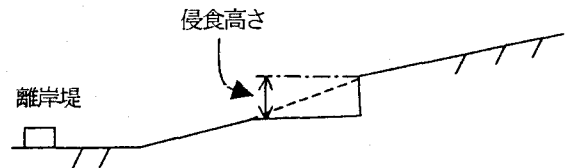


図-13 侵食高さの定義

表-3 領域と侵食高さの関係

領域	最大侵食高さ (cm)
A	15
A-α	25
B-β	25
B	50
B-α	50
C-β	0
C	0
C-α	20
D-β	50
D	50



写真-1 小松川自然再生工事地区での航走波による河岸侵食

反面、BとDの侵食は50cmと著しい。これは図-8に示したように水位が高くなると離岸堤2と離岸堤4の効果はほとんどないためである。

離岸堤4の下流側では侵食の高さが最大で70cmある。離岸堤4の下流側は、図-6より、柱列杭、河岸、蛇籠によって閉ざされた空間となっている。航走波が上流から入り込む場合、この空間の中で航走波は反射を繰り返すため、侵食が他の領域よりも著しくなっている。さらに侵食高さが高くなると河岸はヒサシ状河岸になり、不安定状態になったヒサシは写真-1のように崩落を起こして侵食速度が速くなる。流れによるヒサシ状河岸の崩落機構はすでに福岡ら^{4), 5), 6)}が明らかにしているが、航走波でも同じような現象が起きていると考えられる。

本文では、小松川自然再生工事地区における離岸堤と侵食高さの関係を検討したが、他の場所について検討する場合は河岸の勾配を考慮に入れる必要がある。

4. 結論

観測の結果、タンカーの造る航走波と離岸堤背後の波について明らかとなった点は次の通りである。

- 1) タンカーが造る航走波エネルギーは船型に依存する。タンカーに積荷のある状態とない状態でもタンカーの波のエネルギーは異なる。
- 2) 航走波は同じ波向を持った波が連続して河岸に伝播する。航路位置から70m以上離れたタンカー波群の最大波高は15~30cmであり、波高順位が大きくなるに従って波高は小さくなる。波高順位が10番目になると波高は10cm程度以下となる。さらに、波高順位と波高の関係は3つのパターンに分類された。
- 3) 波向は船の種類や形状、船速度に依存する。タンカーの持つ波向は15°~50°である。
- 4) 離岸堤上に水深が10cm~15cm程度以下になると航走波の透過波高を5割以内に抑えることができる。小松川自然再生工事地区では離岸堤高さがA.P +1.7mの離岸堤背後における河岸の侵食はほとんど起きていない。

- 5) 離岸堤間隔が6mの場合、回折による波のエネルギー分散による入射波の減衰効果は顕著である。しかし、離岸堤間隔が12mの場合は6mの場合に比べて減衰効果は期待できない。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 仲本吉宏, 細川真也, 泊宏, 京才俊則: ヨシ原河岸をもつ河道における航走波のエネルギー分布特性, 河川技術論文集, 第7巻, pp.279-284, 2001.
- 2) 福岡捷二, 甲村謙友, 渡邊明英, 三浦央晴: 船が造る波のエネルギーを減衰させるヨシ原河岸の効果, 水工学論文集, 第36巻, pp713-716, 1992.
- 3) 田畑和寛, 大手俊治, 江上和也, 平田真二, 福岡捷二: 荒川下流域におけるヨシ原の形成と保全のプロセス, 河川技術論文集, 第7巻, pp.273-278, 2001.
- 4) 福岡捷二, 大東道朗, 西村達也, 佐藤健二: ヒサシ河岸を有する流路の流れと河床変動, 土木学会論文集, No.533/II-34, pp147-156, 1996.2.
- 5) 福岡捷二, 石川浩, 日比野忠史, 島本重寿: 粘着性(ガタ土)流路の侵食, 掃流機構に関する研究, 水工学論文集, 第40巻, pp965-970, 1996.
- 6) 建設省関東地方建設局荒川上流工事事務所: 河岸侵食・拡幅機構に関する研究, pp4-22, pp50-58, 1994.
- 7) 倉田克彦, 小田一紀, 平井住夫: 浅海水路中の航走波の特性および繫留船に及ぼすその影響, 第30回海岸工学論文集, pp598-602, 1983.
- 8) 谷本勝利, 中村廣昭, 小林豪毅: 河川における航走波について一直立護岸水路に対する数値計算一, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp369-374, 2000.6.

(2001.10.1受付)