

氏名	LA VINH TRUNG
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工乙第 223 号
学位授与年月日	平成 27 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	Riverbank Erosion under Boat-Generated Wave Attacks and Proposed Countermeasures on Wave Attenuation (航走波による河岸浸食とその対策に関する研究)
論文審査委員	委員長 教授 田中 規夫 委員 教授 浅枝 隆 委員 准教授 李 漢洙 委員 教授 川本 健

## 論文の内容の要旨

Although bank erosion has been the interest of numerous studies, just a little work has been done on the impact of waves, either natural or anthropogenic. It is well-accepted that the bank erosion rate is dependent on the frequency of wave impacts as well as the wave energy relative to soil resistance of riverbank. In heavily navigated rivers and channels, high frequency of ships/boats generates waves constantly attacking towards riverbank and therefore puts banks under the risk of being eroded. In recent years, due to considerably increasing demand of inland waterway transportation served for daily activities such as business, passenger and cargo loading, tourism, etc...a large number of boats/ship have been observed. Especially, with the appearance of high speed boats getting more common, the ones equipped with power engine that move relatively close to the riverbank and generate high waves, wave-induced bank collapse is becoming a severe problem. This study presents three field investigations. The first one was conducted in Arakawa River in Japan. This work is a preliminary stage with an aim to identify whether heavy navigation-generated waves is the main factor causing sediment movement in the river. The results showed that the amount of sediment movement caused by a ship run (15 minutes) is smaller than that caused by tide (7 hours). However, by considering the time consuming, the effect of ship wave on sediment transportation is much greater than tide. And in such a heavily navigated river, this effect should be more impressive. The second one was conducted at five rivers in Ca Mau Province, Southern part of Vietnam. At each site, boat-generated wave and soil of riverbank characteristics were collected. The shear stress induced by boat waves acting on riverbed is excessive the critical shear stress of soil which means bank erosion is occurring. The observation at two sites showed that vegetation can protect riverbank from erosion by attenuating wave energy. Based on the field sites, wave and vegetation characteristics, such a 10 m width for sparse vegetation or an 8 m width for dense vegetation is able to dissipate completely the wave energy and therefore prevent bank erosion due to wave attacks. In the third field investigation, the efficiency of vegetation on wave attenuation was elucidated. Two vegetation species were compared in aspect of wave attenuation capability, including *Rhizophora apiculata* and *Nypa fruticans*. The results indicated that wave heights reduced exponentially and about a half of initial incident

wave height was reduced in the short distance when propagating through vegetation. Wave reduction is dependent on vegetation porosity, incident wave height, and still water depth. The effect of vegetation porosity, however, is more sensitive compared to the latter. *Rhizophora apiculata* is better than *Nypa fruticans* on wave attenuation even though its porosity is greater. It should be due to the special root structure of this mangrove species which acts like a natural net, interrupting and breaking up the wave train effectively. By taking ground slope effect into account, under steeper slope condition compared to previous studies, it is explainable why the wave reduction rate in present study is more impressive. Similar results were obtained in the study of Brinkman (2006) because of relatively close slope condition. The last part of this study discusses about applying artificial porous structure on riverbank protection. It rises from the fact that in some areas, especially in the cities where land is limited or soil condition is not allowable, vegetation belt may not be planted and man-made structures are built instead. Experimental study was conducted in combination with 1-D model to establish the relationship between drag coefficient and porosity. The optimal porosity to mitigate wave attacks was then determined by a 2-D model taking into consideration not only cross slope behind groins ( $i$ ) but also the gap between two neighboring groins ( $G$ ). In cases of  $i = 1/100$ , the combination of  $i = 0.4$  and  $L/G = 5$  ( $L$  is the stream-wise length of a groin) could bring out the best wave energy reduction. Thus, it is necessary to consider both of  $i$  and  $G$  for designing stream-wise groins.

## 論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会は、平成 27 年 1 月 26 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて質疑と論文内容の審査を行なった。以下に審査結果を要約する。

大規模な河岸侵食の問題は古くから問題視され、洪水時の侵食量の定量評価や構造物を用いた侵食対策を中心に議論がなされてきた。とりわけデルタ地帯では人口が集中し、多くの居住地が形成されていることから、河岸侵食の進行によって生活基盤が脅かされるだけでなく、時として大規模な侵食は人命にもかかわる重要な問題となる。Trung 氏が主に研究対象としたベトナムのメコンデルタにおいても大規模な河岸侵食が生じている。一般的には河岸侵食を引き起こす要因は洪水、潮汐など、種々考えられるものの、どの要因が主要因であるかに関しては不明な点が多い。侵食を引き起こす要因によっては、その対策手法も異なることから、研究対象地域における主要因を明らかにする必要がある。また、研究対象地域では船の航行が極めて盛んであるという背景もあり、上記の要因に加えて航走波も要因として挙げられる。日本においては、航走波に対する河岸侵食対策として、離岸堤を設置することで河岸に作用する波のエネルギーを低減させることで侵食を抑える対策が実施されている。しかしながら、ベトナムも含めた発展途上国においては、河道の広範囲に沿ってこうした消波構造物をつくることはコスト面から現実的ではない。さらに、環境に配慮した持続的な開発を進めていく必要があることから、河道沿いへの植生帯の設置が有力な侵食対策の一つとしてあげられる。植生帯を用いた流れの減勢効果は古くから認識されており、パプアニューギニア津波やインド洋大津波時に津波の減勢に大きな効果を果たしたことからさらに良く知られることとなった。しかしながら、航走波のような短周期の波で形成される波動場での植生帯による波の減勢効果に関しては不明な点があり、植生帯を利用した河岸侵食対策を講じる上で基礎的な知見を得る必要がある。そのため、Trung 氏は、1) 調査対象地域において、洪水流量、船舶の航行台数と河岸侵食量との関係を調べ、河岸侵食の主要因を明らかにすること、2) 航走波による河岸の侵食限界を評価し、侵食防止する植生帯の設置条件を明らかにすること、3) 異なる横断勾配条件下において空隙物体（植生帯および構造物）による航走波の減勢効果を明らかにすること、を目的として研究を行なった。

論文の第 1 章および第 2 章では、河岸侵食の主要因について検討している。まず、第 1 章では、対象地域であるベトナムのデルタ地帯（Ca Mau 州）の複数河川において、2002 年から 2008 年の洪水流量、船舶の航行台数と 2004、2005、2008 年に取得された河道横断測量成果を用いた河岸侵食量を比較している。その結果、2 期間（期間 A:2004-2005、期間 B:2005-2008）での、年侵食率（m/year）は期間 A では 0.9-1.2、期間 B では 3.0-4.0 と大きな差があった。一方、洪水流量については、期間 A,B とも大きな変化はみられなかったものの、船舶の航行台数については B 期間（およそ 58000 台）が A 期間（およそ 29000 台）の 2 倍程度増加していることを明らかにしている。このことは、同地域の河岸侵食が航走波によって増加していることを示唆している。潮汐が河岸侵食に与える影響は、類似条件の荒川において航走波、潮汐による河岸付近の土砂移動量を観測し比較している。その結果、航走波（波の継続時間は 10 分程度）の土砂移動量（3g 程度）は潮汐（冠水から干出するまでの約 12 時間）による土砂移動量（5g 程度）に比べ小さいものの、荒川での航行頻度（約 30 隻/日）からすると、航走波による土砂移動量の方が河岸付近の地形変化に大きな影響を及ぼしていることを明らかにしている。論文の第 1 章、第 2 章で得られた成果をもとに、論文の第 3 章以降では、船舶の航行が盛んな河川においては、河岸侵食に支配的な要因として航走波のみに着目した検討を実施している。

論文の第 3 章では、ベトナム Ca Mau 州で船舶の航行が多い複数河川において、現地調査および植生抵抗・

空隙影響を含む平面二次元流運動方程式により、航走波が河岸侵食に及ぼす影響をとりまとめている。現地調査では、各検討対象河川（Cai Nai 川, Bay Hap 川, Dam doi 川, Dam Chim 川, Cai Lon 川）の各3地点において、河岸土壌の限界せん断力を把握するためベーンせん断試験を実施している。一方、航走波の数値解析では、まず各観測地点において計測された航走波の最大波高および水面の時間変化を評価可能であることを確認したうえで、河岸付近の底面せん断力の最大値を算出している。各検討地点の航走波による底面せん断力の最大値と上記の限界せん断力を比較したところ、限界せん断力を下回る底面せん断力が作用していた Cai Lon 川では実際に河岸侵食の実績がなく、底面せん断力が限界せん断力を上回っていた4河川（Cai Nai 川, Bay hap 川, Dam Doi 川, Dam Chim 川）では、2～4m/yearの河岸侵食の実績があることを確認している。また、河岸侵食の実績がない Cai Lon 川では、河岸にマングローブが繁茂しており、この植生帯によって河岸付近の底面せん断力の減少が生じたと考えられる。しかしながら、実際に河岸侵食の防止を目的として植生帯を活用する場合、限界せん断力を下回るために必要な植生帯の条件を把握する必要がある。そこで、Cai Lon 川の断面条件下で、植生帯の奥行 ( $l$ )、河岸からの距離 ( $W$ )、樹林帯密度 ( $N$ ) を変化させ、限界せん断力を下回る条件を把握している。その結果、樹林帯密度が小さい場合 ( $N=0.77$  本/m<sup>2</sup>) は  $l/W=0.86$ 、樹林帯密度が大きい場合 ( $N=1.32$  本/m<sup>2</sup>) は  $l/W=0.67$  が必要であるとしている。

論文の第4章では、ベトナム Ca Mau 州において、河岸際に樹種の異なる植生が繁茂する2つの河川（Cai Lon 川, Ong Doc 川）を対象に、樹種・繁茂密度の違いが航走波の減勢に及ぼす影響を、現地観測および第3章でも用いた航走波の数値解析モデルを用いてとりまとめている。現地観測では樹種および密度の違いに着目するため、現地干潮域で頻繁に確認されるニツパヤシ（Ong Doc 川）、フタバナヒルギ（Cai Lon 川）を対象とし、繁茂密度が大きく異なる計4地点において樹林帯内外で航走波の波高を観測している。また、数値計算を実施する際に必要となる各樹種の抗力係数を現地で採取した各樹種の幹部分を用いて直接計測している。数値計算では、実測した樹林帯内外の最大波高を用いてモデルの検証を実施したうえで各地点において波高減衰率を算出し、既往研究の結果と比較している。その結果、既往研究では樹林帯（どちらもフタバナヒルギと同様のマングローブ）による波高減衰率は50-67%であったが、本研究ではどちらの樹種も差が小さく、7.4から8.8%にとどまった。その理由として、既往研究では横断勾配が1/1000-1/2000と非常に緩勾配であるのに対し、本研究では約1/80と急勾配であることが挙げられる。すなわち、急勾配条件下では、底面摩擦による抵抗が植生の抵抗と比較して非常に大きくなったことが原因であると指摘している。このことは、横断勾配によって、河岸侵食を防止するために必要な樹林帯の繁茂状態が変化することを示唆している。そのため、樹林帯の奥行と波高減衰率との関係を横断勾配ごとに把握するための数値計算を追加で検討している。その結果、同じ航走波に対して30%の波高減衰率とするためには、横断勾配が1/80, 1/500, 1/1000ではそれぞれ5m,10m,20mの樹林帯の奥行が必要であることを一例として示している。

論文の第5章では、第4章で明らかになった、空隙物体（樹林帯）の波高減衰効果が横断勾配によって変化することを念頭におき、空隙を有する構造物を対象として、波高減衰率の観点から横断勾配ごとの最適空隙率についてとりまとめている。荒川では、航走波対策として設置されている離岸堤は、横断勾配が異なっても同様の条件（空隙率  $\theta$ 、離岸堤の長さ  $L$ 、離岸堤の設置間隔  $G$ ）で設置されている。しかしながら、横断勾配によって最適な  $\theta$ 、設置条件 ( $L/G$ ) があると考え、水理模型実験、実験スケールの数値解析、現地スケールの数値解析を駆使して、それらの条件の検討を試みている。模型実験では、木枠内に礫を異なる空隙率で充填した離岸堤モデルを設定した造波水路において波高を変化させた複数の規則波を造波し、離岸堤内外の波高を測定した。次に異なる空隙率の離岸堤モデルの抗力係数を把握するため、一次元非線形長波モデルを用いて、実測した波高に合うように、各  $\theta$  における抗力係数を把握した。次に、実験・一次元非線形長波モデルより得られた離岸堤の抗力係数を用いて、現地スケールの航走波の解析（平面二次元計算）を

実施した。その結果、横断勾配が急（1/50）なケースでは、空隙率が小さくなる（密になる）ほど、 $L/G$ が大きくなる（離岸堤間隔が狭くなる）ほど、航走波を減衰可能であり、検討した範囲では最適な条件は見いだせなかった。しかし、横断勾配が緩い（1/100）ケースでは、 $\theta$ が0.3,0.4のケースで $L/G=5$ の時に最も航走波を減衰できることを明らかにしている。このことは、横断勾配や離岸堤の設置条件によっては、航走波の減衰に最適な条件があることを示しており、河岸侵食防止を目的とした空隙構造物を設置する際は、地形条件および構造物の設置条件に十分留意する必要があることを指摘している。

以上のように、本論文は河岸侵食の進むベトナムを主調査対象地域とし、河岸侵食の主要因である航走波による河岸の侵食限界を評価し、侵食防止ための植生帯条件に関して重要な示唆を与えている。このことから、当学位論文審査委員会は、本論文が博士（学術）の学位に相応しい内容であると判断した。

なお、本論文の内容は、第一著者として、国際学術誌 International Journal of Ocean and Water Resources に受理された。さらに、国際学術シンポジウム（国際水圏環境工学会 APD-IAHR ハノイ）でも1回発表済みで、国内学術雑誌（土木学会水工学講演会 東京）において登載が決定している。