マングローブ林による消波と侵食防止の効果評価法

山本 吉道¹・Puangpet RATTANARAMA²・Arjong NOPMUENG³

¹フェロー会員 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1)
E-mail:yo-yamamo@tokai-u.jp

²モンクット王工科大学ラカバン校准教授 建築学部 (Ladkrabang, Bangkok, Thailand)
E-mail:ramaratt@yahoo.com

³東海大学大学院学生 工学研究科土木工学専攻 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1)
E-mail:sakurazaki_blm@hotmail.com

タイ国には、マングローブを大量伐採した結果、深刻な侵食が生じている海岸が各所にある。このような海岸では、離岸堤等の侵食対策構造物が設置されつつあるが、マングローブ林の再生こそ、自然的で持続性のある工法と考えられる。それゆえ、マングローブの中から、植林し易く、7・8年で高い消波効果を期待出来るタイプとして支柱根タイプを選び、これによる消波と侵食防止効果を高い信頼性の基に評価できる方法を提案する。具体的には、水理模型による消波実験を行い、既往文献の消波データと合わせて、実用的な消波効果算定図を作成する。次に、水理模型による侵食実験データを用いて海浜地形変化の良好な再現性を確認した数値予測モデルを用いて、有効なマングローブ林の所要幅を求める。

Key Words : mangrove woods, wave dissipation, coastal erosion prevention, effect evaluation method

1. はじめに

タイ国では、薪・炭材として利用するためや、海老養殖池造成のために、マングローブを大量伐採した結果、深刻な海岸侵食が続いている。マングローブ林が存在する海岸は粘土質であったが、粘土分が流出した結果、シルト質砂浜になっている場合が多い。そして、侵食対策工として、コンクリートブロックや捨石による離岸堤や突堤も存在するが、顕著な沈下が生じるため、土砂を詰めたジオテキスタイル袋による離岸堤や竹製群杭の消波堤も建設されており、Rattanarama¹⁾は、これらに十分な侵食防止効果を期待できるが、これらは恒久的な対策工でないことを言っている。そして、マングローブ林の再生こそ、自然的で持続性のある工法と考えられるため、Nopmueng²⁾は、タイ国での現地調査から、マングローブの中で、植林し易く、7・8年で高い消波効果を期待出来るタイプとして支柱根（複数の根がタコの足のよう伸びて幹を支える）タイプを選び、既往文献より消波効果算定図を作成し、これを用いた侵食防止効果の数値計算から、有効なマングローブ林の所要幅について検討したが、算定図の精度が不十分であった。

本研究では、マングローブ林による消波と侵食防止効果について、信頼性の高い評価方法を提案する。

2. マングローブによる消波効果

(1) 消波効果の水理模型実験

Nopmueng²⁾は、Bao³⁾、Brinkman⁴⁾、Fatimah⁵⁾、Kristiyanto⁶⁾、Narayan⁷⁾、McIvor⁸⁾、Suzaki⁹⁾、TuyenとHung¹⁰⁾の8つの既往研究から、支柱根タイプのマングローブ林に対する波の透過比（透過波高/入射波高）に関するデータを集め、マングローブ林の密集度（ D : 地面1 m²当りの主幹の本数）別に、林の幅と透過比の関係図を作成したが、林の幅に対する波長の影響が考慮されていないため、その精度は高くない。それゆえ、この影響を確認するために、また、波が支柱根の中央部に作用する場合と上部に作用する場合の違いも確認するために、以下の実験を実施した。

Nopmueng²⁾が実施した現地調査成果を基に、図-1に示す支柱根タイプの典型的なマングローブ模型を基本的に同寸法で必要個数造った（ただし、手作りであるため、形状は微妙に異なる。また、二次元水路に千鳥に置く必要性から、左右半分に分けたタイプもある）。そして、図-2及び図-3に示すように、二次元水路に10 cm厚の砂質ローム層（中央粒径0.2 mm、均等係数20）を敷いて、マングローブ模型を固定することで、小規模な林（模型縮尺1/10）を再現した。

図-1 マングローブの模型の写真

 図-2 マングローブ設置例 (実験スケールで $D = 0.5$ の場合)

図-3 消波模型実験装置の説明図

そして、有義波高 (H_i) 1.8 m (模型実験で18 cm) で有義周期 4 秒 (模型実験で1.25秒) の不規則波 (タイ国にて典型的な高波) を入射させて、図-1に示す支柱根の上端から模型上で 3.6 cm 下側に水面 ($h_o/H_i = -0.2$) がある場合と、3.6 cm 上側に水面 ($h_o/H_i = 0.2$) がある場合について、木の密集度 (D) と林幅/波長 (林の直前面) を変えて消波実験を実施した。

ただし、図-3に示されるように、模型地層上で模型林の前後に二基づつの波高計を配置することで、水深が右側造波部と違うことによる影響を排除し、入反射分離も実施した。また、波高測定間での模型地層の底面摩擦の影響は、BretschneiderとReidの式¹¹⁾から波高減衰係数が 0.99以上となるので無視した。さらに、波高を変えることによる波形勾配の違いが透過比に及ぼす影響も、Suzuki⁹⁾の検討によると小さいので無視した。

本水理模型実験の測定データを消波効果についてまとめると、図-4に示すようになった。本図は、相対的水深 (h_o/H_i) が浅くなるほど、また、木の密集度 (模型上では0.01㎡当りの本数) と林幅/波長 (無次元林幅) が大きくなるほど、波の透過比が小さくなることを示す。

(2) 波の透過比算定図の改良

図-4から読取れる $h_o/H_i = 0.0$ に対する透過比を基にして、前述の 8 つの既往研究から得られる支柱根タイプのマングローブ林に対する波の透過比を、木の密集度

 図-4 水理模型実験データによる波の透過比 (D は 1㎡当りの木の本数, h_o/H_i は図-1に示す水面高と入射波高の比)

 図-5 既往文献データと図-4の平均値による波の透過比 ($D=0.3$ は自然林での、 $D=1$ は人工林での最頻度値)

(D) と林幅/波長を変数に整理し直し、図-5に示すように、密集度の3タイプ毎に平均化して消波効果算定図を作成した。Alongi¹²⁾は複数の論文調査から、波の周期 (波長) の違いが林幅と透過比の関係に大きな影響を及ぼすことを指摘し、密集度が高く周期が2～3秒の場合に、透過波高は林幅50m程度で半減するのに対して、普通の密集度で周期が8秒の場合には、半減するために400m程度必要なことを示している。マングローブ林の水深として標準的な0.5～2.0mを想定すれば、この記述と図-5の曲線は良く整合している。

ここで、相対的水深 (h_o/H_i) をゼロで整理した理由は、図-1に示す相対的水深が明確に分かる既往文献が少ないことと、後述する地形変化の検討期間となる一時化の間の潮位変動が大きい場合が普通であるからである。なお、実際の平均水面は根の上端より低いのが普通であり、この条件 ($h_o/H_i=0.0$) は安全側になる。

図-6 侵食防止実験装置の説明図

図-7 マングローブ林無しの実験での汀線付近の侵食状況

図-8 マングローブ林有りの実験での汀線付近の侵食状況

3. マングローブによる侵食防止効果

(1) 侵食防止効果の水理模型実験

Rattanarama¹⁾やNopmueng²⁾は、対策工前面の洗掘に対して高い再現精度を有していることを確認済みのCa¹³⁾の平面二次元地形変化数値モデルを用いて、侵食対策工による防止効果を評価した。しかし、この数値モデルによるマングローブ林陸側の波高・侵食低減の再現精度の確認は十分でない。それゆえ、図-6に示す二次元水路に前述の砂質ロームを用いて侵食の生じやすい勾配1/20の海浜を造り、汀線近傍に出来る顕著な侵食区間の直ぐ沖側（汀線から模型上1.4 m沖側）に模型林（模型上0.01 m²当たり1本の密集度で幅0.8 m）が有る場合と無い場合の侵食実験を、有義波高18 cm、有義周期1.2 secの不規則波を3時間作用させて行った。特に、マングローブ林有りの場合は、岸側侵食量が小さくなり、測定精度が低下するため3回実施した。

マングローブ林無しの場合の汀線付近の侵食状況を

表-1 侵食の実験測定値と数値計算値との比較

作用 時間 (分)	侵食面積(cm ²)						
	マングローブ無し		マングローブ有り				計 算 値
	測定値	計算値	測定値				
			1 回	2 回	3 回	平均	
60	43.0	70	5.7	6.8	7.1	6.5	11
120	91.0	120	7.8	9.0	8.9	8.6	22
180	191.5	200	8.1	11.6	10.9	10.2	35

図-7に示す。1時間後の侵食断面積は43.0 cm²、2時間後には91.0 cm²、3時間後には191.5 cm²になっていた。マングローブ林有りの場合の汀線付近の侵食状況の例を図-8に示す。このケースでの1時間後の侵食断面積は6.8 cm²、2時間後には9.0 cm²、3時間後には11.6 cm²と大幅に低減していた。

(2) 侵食防止効果評価法の精度確認

前述の侵食実験をCa¹³⁾の数値モデルを用いて再現した。本数値モデルでは、流体場を水深方向に積分されたBoussinesq方程式で、砕波によるエネルギー損失を $k-\epsilon$ 乱流モデルで表し、底面摩擦も考慮して、差分法によって解かれ、空間差分にはstaggered gridを、時間差分にはCrank-Nicolson schemeを用いている。そして、Ca¹³⁾は回折・屈折・浅水変形、および、遡上運動の再現性能の高いことを示しているが、マングローブ林による透過波について、Rattanarama¹⁾と同様に透過係数の形で運動方程式に考慮し、その妥当性を本検討で確認する。また、入射波について、方向スペクトル密度関数を用いた成分波の重ね合わせで不規則性を考慮しているが、側面境界からの斜め入射が出来ないため、評価対象海域の両側方に余分な計算領域が必要である。この側方余裕長が計算範囲の岸沖距離の2/3以上あれば支障無いことも確認する。

マングローブ林無しの場合の計算結果を図-9に、同林を両端までの連続施設として設置した場合の計算結果を図-10に示す。ここで、両側方を岸沖距離の2/3ほどカットして表示しており、差分格子間隔は8 cm、波の透過比には、図-4の $D=1.0$ で $ho/Hi = -0.2$ のグラフ上で、林幅/波長 = $0.8\text{m}/1\text{m} = 0.8$ に対する値0.8を、波のエネルギー集中度パラメータ S_{max} には25を用いた。

両図の波高分布の比較から、マングローブ林の陸側近傍での波高比は $(2.8 \sim 2.9\text{cm}) / (3.5 \sim 3.6\text{cm}) = 0.8$ となり、計算条件値と一致することから、透過波の計算精度の高いことを確認できた。さらに、水深変化量図において、汀線の海側近くに集中的に生じる侵食断面積の平均値を求め、侵食実験から得られた侵食断面積の実測値と共に表-1に整理した。これらの数値を比較すれば、図-11に示すようになり、計算値の侵食の方が大きい結果になっているが、本図の数値間の相関係数を求めると0.99となり、十分に良い再現精度を得られていると判断できる。

図-9 マングローブ林無しの場合の波高と水深変化量の数値計算結果 (図中の数値は水深コンターの値)

図-10 マングローブ林有りの場合の波高と水深変化量の数値計算結果 (図中の数値は水深コンターの値)

なお、これらの図には波が側方境界から入射されないことによる影響が及んでいないことが読み取れるので、側方余裕長は岸沖距離の $\frac{2}{3}$ で十分であると言える。

また、マングローブ林有りの侵食断面積の計算値が実測値より大きくなった原因として、実験波高の目測の方が計算値より小さかった印象があること、および、侵食実験のマングローブ林の平均水深が消波実験の同林の水深に比べて相当に浅いことから、マングローブ林による消波効果を過小評価していた可能性と、底面摩擦係数を標準の 0.01 にしていたのでは、底面摩擦力を過小評価していた可能性を指摘できる。

図-11 侵食断面積の実験実測値と数値計算値との相関

(3) マングローブ林による侵食防止効果の評価

支柱根タイプのマングローブ林による侵食防止効果とRattanaramaら¹⁾の離岸堤による防止効果とを比較するため、以下に示す条件で侵食予測計算を行った：

(a) 図-5の算定図とCaら¹³⁾の数値モデルによる評価法は、前節の検討からマングローブによる侵食防止効果を過小評価する可能性を否定できないが、これは安全側の結果を得られることを意味するので、この組合せで評価する。なお、内山¹⁴⁾などが指摘しているように、典型的な干満での地形変化に対して、波と海浜流による機械的作用が及ぼす影響は限られている。しかし、タイ湾奥のシルト質海岸では、マングローブ林伐採によって波当たりが強くなった結果、侵食が進み、粘土分が流失して砂質分が相対的に増えて、海岸地形変化を波と海浜流による機械的作用で説明できる場合が増えている。Rattanaramaら¹⁾もCaら¹³⁾の数値モデルで離岸堤陸側の侵食防止効果を良好に再現出来たことを報告している。

(b) 検討のためのモデル海岸には、タイ湾奥で見かける典型的な侵食海岸として、海底勾配1/200で、底質中央粒径0.1 mmのシルト質海岸を設定し、差分計算での格子間隔は1.25 mとする。

(c) 外力データには、タイ国政府から入手した2005年3月～2006年11月の波観測値と2011年1月～12月の波推算値を一日平均値で整理したデータから、時化時外力として平均有義波高1.25 m、平均有義周期3.7 secの波を3日連続作用させる。この全波エネルギーは1年間の高波時波エネルギーに相当する。また、波の S_{max} には25を用いる。

(d) 比較検討ケースは、侵食防止工無し、土砂を詰めたジオテキスタイル袋による離岸堤、および、支柱根タイプのマングローブ林 ($D=1$ ；タイ国の人工林に多い密集度) を設置した計3ケースとする。

ジオテキスタイル製離岸堤の寸法は実例に合わせて、高さ2.5 m×幅5 m×長さ50 mの1袋が1基の離岸堤とする。設置する平均水深は最深例に合わせて1.6 m程度とする。本離岸堤による侵食防止効果は、タイ湾奥部での干満の潮位差が約3 mであることから、不透過体の非潜堤と潜堤の場合について地形変化計算を行い、各々の継続時間比(4:1)を重みに用いた平均値から評価する。

この潮位変化を考慮した本離岸堤の侵食防止効果と同程度の効果を期待出来る非潜堤タイプの透過堤(水深を平均潮位時に固定)の透過比をCaらの数値モデルから求めると約0.33であった。この透過比と同程度の消波効果を期待出来るマングローブ林の幅は、図-5において $D=1$ のグラフで、透過比0.33に対応した170 m ($=11.5 \times \sqrt{9.8 \times 1.6 \times 3.7}$) とする。林の沿岸長は本離岸堤との比較のため、不自然であるが50 mとした。本林の設置水深は、林の陸側端の平均水深を1.5 m(干満潮位差が約3 mゆえ、干潮時にちょうど干上がる水深) とすれば、

沖側端の平均水深は2.35 mとなる。マングローブ林の水深が2 mを越えることは稀であるが、林陸側の侵食防止効果をジオテキスタイル製離岸堤のそれと比較するため、設置水深をこれ以上浅くしない。

これら3ケースのCaらの数値モデルによる計算結果を図-12～図-14に示す。これらの図の比較から、マングローブ林が陸側海域で、ジオテキスタイル製離岸堤と同程度以上の侵食防止効果を発揮することを確認できた。

4. 主要な結論

(1) マングローブ林直前面での入射有義波の波高と波長、および、林の密集度と岸沖幅から不規則波の透過比を求められる算定図を作成できた。

図-12 侵食防止工無しの水深変化計算結果

図-13 ジオテキスタイル製離岸堤の水深変化計算結果

図-14 マングローブ林の水深変化計算結果

(2) Caらの数値モデルは平面二次元モデルであるため、通常のPCで簡便に計算可能であり、侵食実験データとの比較から、海岸地形変化について十分な予測精度を有することを確認できた。そして、典型的なジオテクスタイル製離岸堤と同程度の侵食防止効果を期待できるマングローブ林の幅は、地面 1 m²当り 1 本の密集度で、170 mとなることをCaらの数値モデルから確認できた。

謝辞：本研究は、東海大学後援会とモンクット王工科大学の研究助成によって、成し遂げることが出来ました。ここに、記して感謝の意を評します。

参考文献

- 1) Rattanarama, P., Nopmueng, A., 山本吉道: シルト質内湾での現地特性を活かした海岸侵食対策の検討, 土木学会論文集

- B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.171-172, 2013.
- 2) Nopmueng, A., 山本吉道, Rattanarama, P.: タイ国でのマングローブ林の特徴と海岸侵食防止効果, 土木学会論文集 B 3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.1768-1773, 2014.
- 3) Bao, T. Q.: Effect of mangrove forest structures on wave attenuation in coastal Vietnam, *OCEANOLOGIA*, 53 (3), doi: 10.5697/oc.53-3.807, pp.807-818, 2011.
- 4) Brinkman, R. M.: *Wave attenuation in mangrove forests: an investigation through field and theoretical studies*, pp. 85-109, PhD thesis in James Cook University, 2006.
- 5) Fatimah, E., Wahab, A. K. A. and Ismail, H.: Numerical modeling approach of an artificial mangrove root system (ArMS) submerged breakwater as wetland habitat protector, *COPEDEC VII*, Dubai, UAE, Paper No.F-01, pp.1-20, 2008.
- 6) Kristiyanto, A., Armono, H. D. and Soemarmo: Sea Wave Transmission at the Mangrove Forest of Rhizophora Sp, *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, Vol.2, Issue7, ISSN (e): 2319 – 1813 ISSN (p): 2319 – 1805, pp.9-17, 2013.
- 7) Narayan, S.: *The Effectiveness of Mangroves in Attenuating Cyclone-induced Waves*, pp.42-72, Master thesis in Delft University of Technology, 2009.
- 8) McIvor, A., Moller, I., Spencer, T. and Spalding, M.: *Reduction of Wind and Swell Waves by Mangroves*, Natural Coastal Protection Series ISSN 2050-7941, University of Cambridge, pp.1-27, 2012.
- 9) Suzuki, T.: *Wave Dissipation Over Vegetation Fields*, doctoral dissertation in Delft University of Technology, ISBN978-94-91211-44-7, 2011.
- 10) Tuyen, Nguyen Ba. and Hung, Hlo Viet: An Experimental Study on Wave Reduction Efficiency of Mangrove Forests, *APAC2009*, 2009.
- 11) Bretschneider, C. L. and R. O. Reid: Modification of wave height due to bottom friction and reflection, *B.E.B. Tech. Memo.*, No.45, 1954.
- 12) Alongi, M. D.: *The Energetics of Mangrove Forests*, Springer, 216p, 2009.
- 13) Ca, V. T., Yamamoto, Y., Tanimoto, K. and Arimura, J.: Simulation on wave dynamics and scouring near coastal structures by a numerical model, *Proc. 28th Int. Conf. on Coastal Engrg.*, ASCE, pp.1817-1829, 2002.
- 14) 内山雄介: 干潟のながれと地形変化, *ながれ*, 24, pp.57-66, 2005.

(2015.3.18 受付)

EVALUATION METHODS OF THE EFFECT FOR WAVE DISSIPATION AND EROSION PREVENTION BY MANGROVES

Yoshimichi YAMAMOTO, Puangpet RATTANARAMA and Arjong NOPMUENG

In Thailand, there are many coasts where serious erosion has occurred owing to the deforestation of mangroves. Coastal structures for preventing the erosion, such as a detached breakwater, are being constructed on many such coasts. However, just reproduction of a mangrove wood is considered to be a natural and perpetual countermeasure. So, from all the kinds of mangroves, as the type of which reproduction of woods is easy and as the type which is expected high wave dissipation effect in 7-8 years, the type which has supporting roots like octopus-legs is chosen, and methods for evaluating the effect of wave dissipation and erosion prevention by this type on the basis of high reliability are proposed. Specifically, experiments on the wave dissipation effect by mangroves are conducted, and a practical diagram for evaluating the wave dissipation ratio is proposed by combining with the data of existing papers. Next, the good reproducibility of the numerical simulation model for predicting coastal topographical change of Ca et al. is checked using experimental data on the erosion prevention effect by mangroves. Then, the necessary width of an effective mangrove wood is examined using the numerical simulation model.