

人工植生モデルの抵抗による津波減衰効果の検討 — 様勾配斜面での植生の場合 —

原田 賢治*・今村 文彦*

1. はじめに

日本を含め環太平洋に属する諸国は地震・津波の災害を受け多くの犠牲や多額の経済損失を強いられている。とりわけ東南アジア諸国ではその頻度が高いにもかかわらず、減災のための防止・抑止策が十分に取られていないのが現状である。その中で環境問題とも関連し、その地域の自然を生かした津波防災対策として熱帯・亜熱帯地域沿岸に分布するマングローブ林やココナツなどの沿岸樹林帯による津波減衰効果が注目されている(原田ら, 2000; 平石ら, 2001)。一方, 首藤(1985)は過去の事例より防潮林の津波による破壊限界から防潮林による効果の有無の判定図を示している。しかし, 津波災害の指標となる流速や浸水域が防潮林によってどれだけ減少をするのかと言った定量的な減衰効果については示されていない。防潮林による効果の定量的な評価方法としては原田ら(2000)により防潮林を抵抗として取り込んだ数値シミュレーション方法が提案されている。防潮林の抵抗としての効果を評価する際に重要となる抵抗係数についてはHarada and Imamura (2001)が水理実験より樹林帯の抵抗係数のモデルの提案を行っているが, 1種類の実験モデルを1つの地形のみ実施しており, 他の状況での適応性については検討されていない。そこで, 本論では新たに人工植生モデルを作成し水理実験を行い, この実験結果と数値シミュレーション結果との比較により抵抗モデルの適応性を検討した。

2. 水理模型実験

2.1 人工植生モデル

樹林帯モデルは根, 幹, 葉の三つの部分からなり, 厚さ0.05mの透過性マット(ヘチマロン)を根部として水路床(0.0-0.05m)に設置し, 葉部として高さ0.15-0.20mにも設置した(Photo 1, Fig. 1 参照)。樹幹部は直径0.01mのプラスチック製円柱を合計72本, 千鳥格子状(0.08m間隔, 6本×12列)に配置している。模型の大きさは幅0.5m, 波の進行方向に0.5m, 葉部上面までの高さは0.2mである。実験時における本模型の体積占有率は水深変化により0.06-0.12の間変化する。

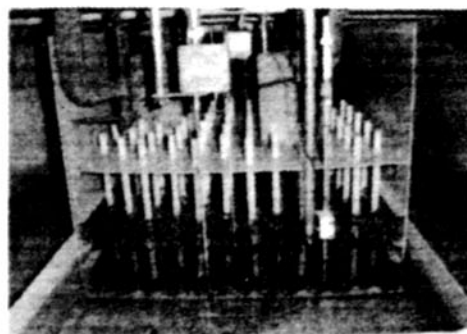


Photo 1 Experimental model

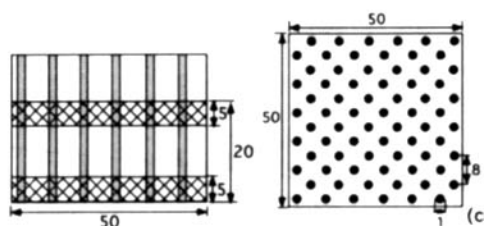


Fig. 1 Sketch of the Experimental model for greenbelt to control tsunamis

*東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

2.2 実験条件

水理模型実験は独立行政法人港湾空港技術研究所の有する津波実験水路を用いて行った。実験水路はFig. 2に示す全長20.8m、幅1.0mのコンクリート製の二次元開水路である。水路端に設置された造波装置は、真空ポンプにより水路床より2.5mの高さまで水をタンクへ吸い上げ、水槽上部にある開放電磁弁を開放することによりタンク内の水塊を落下させ段波状の津波を造波させる装置である。開放電磁弁は5基取り付けられており、この5基の電磁弁の開閉数により発生させる津波の波高を制御することが可能である。1/30勾配の1様斜面上では十分な津波高さを確保するために、1.0mある水路幅を0.5mまで縮小させて実験を行った。

計測はFig. 3に示す測点1（縮流部入り口、入射）、測点2（模型前面）、測点3（模型後面）、測点4（遡上部、透過後）の合計4点で行った。人工植生モデルは測点2と測点3の

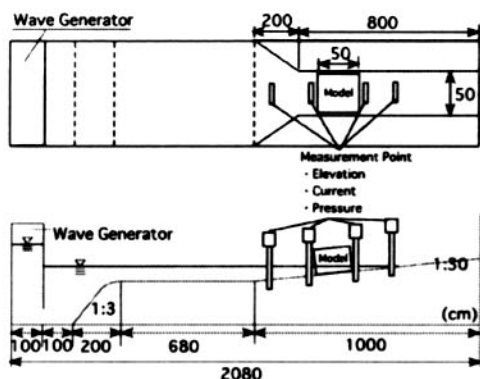


Fig. 2 Experimental set up

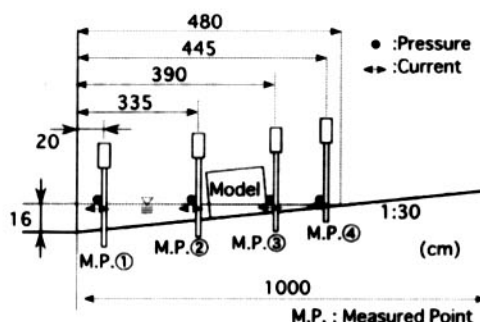


Fig. 3 Measuring points

間に設置し、各計測地点には容量式波高計、電磁流速計、波圧計を設置して計測を行った。実験では各計測項目について開放電磁弁の開放による造波と同時に計測を開始した。

3. 実験結果

3.1 水位・流速の変化

実験より計測された各計測地点での水位をFig. 4に示す。また、人工植生モデルによる変化を知るため、人工植生モデルを用いない条件で計測された水位についても同様にFig. 4に示す。同様に、流速についても計測された結果をFig. 5に示す。水位と流速は津波による家屋被害について議論する際に重要な物理量であり、特に津波流体力による家屋被害を評価する際には流体力算出のために重要な要素となるものである。

Fig. 4より植生模型前面で反射による水位上昇、通過後の2点で植生模型通過によるエネルギー減衰により水位低下がおきている。同様の理由でFig. 5より、模型前面での流速の低下、通過後の2点での流速の低下がおきている。沿岸域では樹林帯の背後に家屋が存在することが一般的であるので、植生モデル

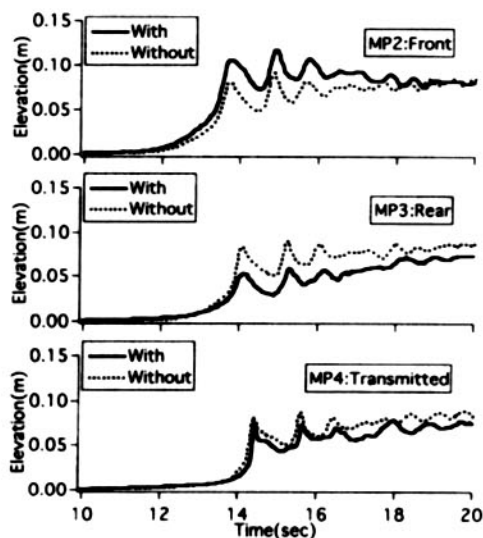


Fig. 4 Comparison of elevation measured with and without artificial forest model

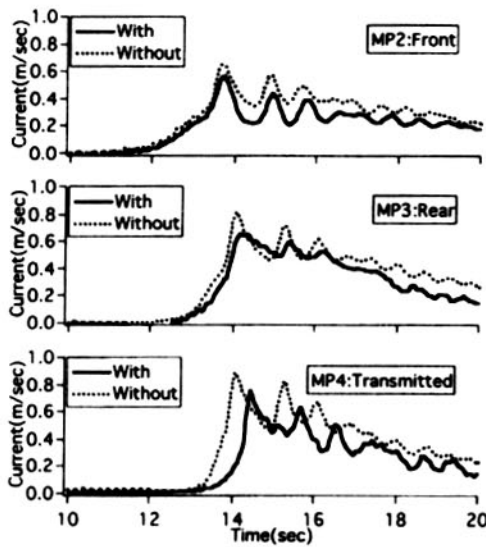


Fig. 5 Comparison of current measured with and without artificial forest model

通過後の水位・流速低下は植生背後での家屋被害を軽減する効果があることを示している。

3.2 作用力

次に植生モデルが津波に対し抵抗としてどのように作用したのかを検討するため、模型に働いた作用力を実験結果より算出する。計測された実験結果を用いて樹林帯モデルの模型前面に作用する力： F_f と後面に作用する力： F_r を算出し、その合力を模型全体に作用する力として全作用力： F_t を算出した。前後面での作用力は各部材ごとに作用力と作用面積を求め掛け合わせ合計を取ることで(1)式のようにして全作用力を求めた。前面での作用力は計測波圧を使い、水面での圧力を0とし、計測位置より底面までは計測圧の静水圧からの変化量を鉛直方向に一様であると仮定して算出した (Fig. 6 参照)。

$$F_t = F_f - F_r \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F_t ：全作用力、 F_f ：模型前面での作用力、 F_r ：模型後面での作用力を意味する。

Fig. 7 に (1) 式により算出された全作用力： F_t 、前面での作用力： F_f 、後面での作用

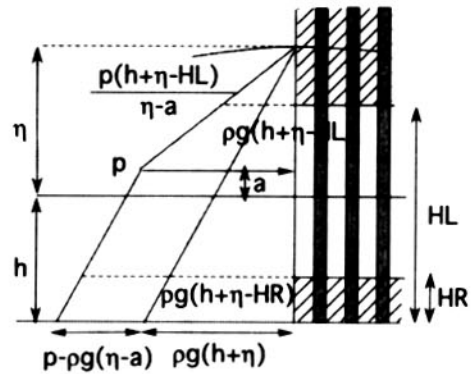


Fig. 6 Acting force at front side

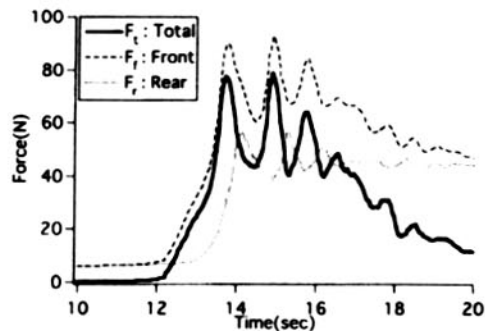


Fig. 7 Acting force to artificial forest model

力： F_r の時間変化を示す。模型前面における作用力は大きく、模型後面における作用力は前面に比べ小さくなっており、模型前後面における作用力が大きく異なることがわかる。Fig. 4 の計測水位の結果とFig. 7 の作用力の結果より、前後面における作用力の差異は水位差の変動と同じ傾向にあり、主に前後面での静水圧の違いによる力が植生モデルに働いていると考えられる。津波の場合においても、動的波圧の影響は静水圧のものに比べて小さいと判断できた。

4. 抵抗モデルを用いた津波数値シミュレーション

4.1 数値計算方法

原田ら (2000) の津波数値計算方法にならい、植生モデルによる効果を数値シミュレーションモデルに取り入れるため浅水理論の運動方程式に防潮林の抵抗を表す項を流体力と

して付加したものをを用いる。流体力はMorison式を用いて抗力項と慣性力項を運動方程式に取り入れている。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M/M' + \frac{C_D}{2} \frac{A_o}{\Delta x \Delta y} \frac{M'/M'}{D^2} + C_M \frac{V_o}{V} \frac{\partial M'}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 η は静水面からの水位変動量、 M は線流量、 D は全水深、 n はManningの粗度係数、 C_D は抗力係数、 C_M は付加質量係数、 V は植生モデルの存在する区間における水面下の全体積、 V_o 、 A_o は体積 V 中の植生モデルの占める体積および植生モデルの投影面積を意味する。 Δx 、 Δy はそれぞれの方向のメッシュサイズを表す。この方程式を数値的に差分して数値シミュレーションに用いた。ここで、抗力項と慣性力項に用いた線流量 M' は模型の無い条件下での線流量であり、抗力項、慣性力項を用いないで数値シミュレーションを行った結果より用いた。

4.2 樹林帯の抵抗係数モデル

(2) 式の運動方程式を津波数値シミュレーションに用いる際に、抵抗係数はHarada and Imamura (2001) より (3) 式の様子と与え、抗力係数： C_D は植生モデルの体積占有率： V_o/V により変化し、慣性力係数： C_M は定数とした。この抵抗モデルは、マングローブ模型を用いた水理実験により流体力を直接計測し、流体力はMorison式に従うとしてモデル化が行われている。このときMorison式中の流速は模型の影響を受けない流速として模型のない条件下での流速が用いられている。従って、(3) 式の抵抗モデルを数値シミュレーションに用いる時には模型のない条件下での線流量： M' を抗力項と慣性力項に用いている。

$$\begin{cases} C_D = 8.4 V_o / V + 0.66 \\ C_M = 1.7 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

5. 水理実験の再現計算

5.1 計算結果と実験結果の比較：水位と流速抵抗係数モデル (3) の妥当性および適応性を検討するために今回行った水理実験条件を用いて数値シミュレーションを行い計測された実験結果と比較する。入射境界としてM.P.1での計測データを強制入力させて計算を行った。計算格子間隔は $\Delta x=0.05$ (m)、 $\Delta t=0.01$ (sec) とした。

Fig. 8 に模型前：M.P.2、模型後：M.P.3、通過後：M.P.4の位置での波高について、実験結果と抵抗モデルを用いた計算結果の比較を示す。水位に関しては、抵抗係数モデルを用いた計算値は全体的に良い一致を示している。この数値計算に用いた抵抗係数モデル (3) の算出には今回の実験データは含まれておらず、このことは (3) 式によって与えられる抵抗係数は妥当な値を示しており、体積占有率による異なる植生密度への適応性があることを示している。しかし、計算時間後半 (17sec以降) では若干の差異が生じている。

Fig. 9 に模型前：M.P.2、模型後：M.P.3、通過後：M.P.4の位置での流速について、実験結果と抵抗モデルを用いた計算結果の比較

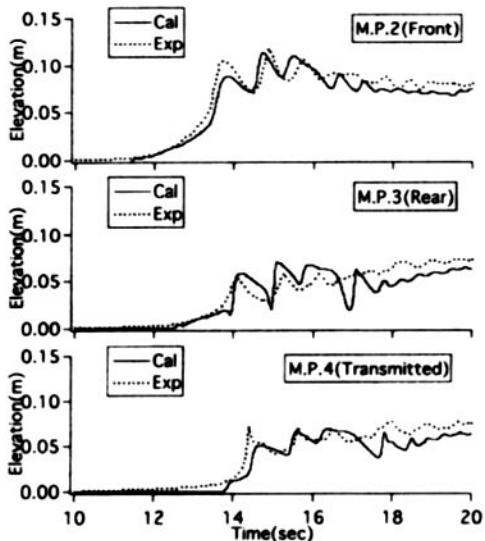


Fig. 8 Comparison of Elevations between Measured and Calculated

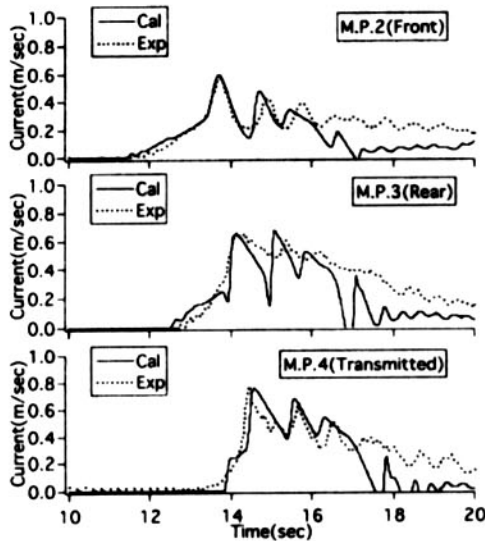


Fig. 9 Comparison of Currents between Measured and Calculated

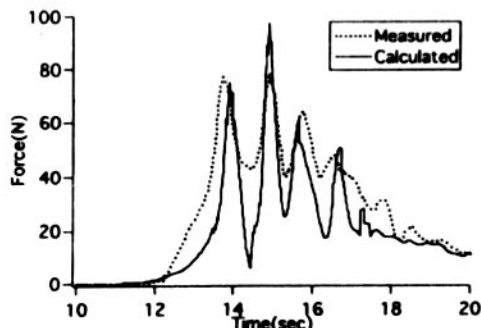


Fig.10 Comparison with measured force and calculated force

を示す。波高での比較と比べると計測値と計算値の間には、ピークでは良く一致するものの、17sec以降の時間では計算値が小さく算出されている。この計算時間後半における水位と流速の差異については、今後さらに検討を行う必要がある。

5.2 計算結果と実験結果の比較：作用力

Fig.10に実験より求めた全作用力と計算で求められた全抵抗力の時間変化を示す。全作用力と全抵抗力は作用反作用の関係にある。計測された全作用力と計算された全抵抗力の時間波形の峰の値は良く一致している。これ

により抵抗係数モデル (3) の抵抗力に対する妥当性及び適応性が示された。また、水位・流速で見られた様な計算時間後半での大きなずれは作用力には見られなかった。しかし、谷の時間では計算値が過小評価されている。今後、数値計算における作用力の算出過程を水位・流速と合わせて確認し、原因を明らかにし改善する必要がある。

6. おわりに

実験データと数値計算結果の比較より、異なる状況での樹林帯抵抗モデルの妥当性、適応性を検討した。その結果、水位・流速に関しては全体的に良い一致を示し抵抗モデルの妥当性、適応性が示された。しかし計算時間後半では差異が生じており、抵抗力（作用力）については時間波形の峰では良く一致するが谷の時間では一致しない計算結果となった。特に、抵抗力については計算過程を確認してみる必要がある。今後さらに、津波による被害と水理量の関係より樹林帯による防災効果を評価するために、これらの水理量を樹林帯が存在するときに精度良く計算できるようにする必要がある。これにより沿岸樹林帯を考慮した津波遡上計算が可能となり、この結果は土地利用計画や津波防災対策に対する有益な情報となる。

謝 辞

水理実験を行うにあたり、実験施設の使用に関して協力を頂いた独立行政法人港湾空港技術研究所に深謝する。また本研究は科学研究費補助金（特別研究員奨励費）の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 原田賢治・油屋貴子・Latief Hamzah・今村文彦 (2000)：防潮林の津波に対する減衰効果の検討，海岸工学講演会論文集，第47巻，pp. 366-370.

平石哲也・竹村慎治・永瀬恭一 (2001) : 南太平洋地域における植林による津波対策方の適用性, 海岸工学講演会論文集, 第48巻, pp. 1411-1415

首藤伸夫 (1985) : 防潮林の津波に対する効果と限界, 海岸工学論文集, 第32巻, pp. 465-469

Harada K. and F. Imamura (2001).
"Experimental study on the resistance by mangrove under the unsteady flow,"
Proceedings of the first Asian and Pacific Coastal Engineering Conference, Dalian, China, Vol. 2, pp. 975-984.