マングローブを用いた津波減衰効果の数値モデリング手法に関する検討

田所　彩花[1]・Adi Prasetyo[2]・村田　慎[3]・渡部　真史[4]・有川　太郎[5]

[1]中央大学大学院　理工学研究科都市人間環境学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
E-mail:a16.treh@g.chuo-u.ac.jp
[2] Station of Coastal Engineering Research Center for Water Resources, Ministry of Pablic Works and Housing
E-mail: madjutakgentar@yahoo.com
[3]八千代エンジニアリング株式会社　海外事業部　交通基盤部（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8）
E-mail: murata@yachiyo-eng.co.jp
[1]正会員　中央大学助教　理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
E-mail:watanabe.07w@g.chuo-u.ac.jp
[1]正会員　中央大学教授　理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
E-mail:taro.arikawa.38d@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

海岸林やマングローブをはじめとする沿岸植生による，グリーンインフラとしての減災効果が注目されている．特に砕波帯など波動方程式系での解析よりも3次元方程式で計算するほうが望ましいが，複雑な支柱根形状を有するような植生に関しては，細かなモデル化は現状の数値計算処理速度では困難である．そこで，本研究では，マングローブを対象として空隙率で簡易的に再現し，低コストな計算手法の確立を目的とした．物理実験との比較を通してその妥当性を検証するとともに，現地の断面形状を用いて嵩上げ道路と一体となった減災効果を検討した．それにより，数値計算では実験より，多少過小評価ではあるものの，整合した結果が得られたが，支柱根形状からの，多重反射の影響や，計算手法の汎用化の検討が今後の課題である．

Key Words : *mangrove, tsunami reduction, numerical modedling, hyblid measures, green infrastructure*

1.　はじめに

海岸林やマングローブをはじめとする沿岸植生による，グリーンインフラとしての減災効果が注目されている[1)]．特に複雑な支柱根形状を有するマングローブに関しては，減衰効果の定量的評価を実現するために3Dスキャナでモデル化し作成した模型を用いた実験などが行われているが[2)]，数値計算において植生全てを細かく再現することは計算コストの面で非現実的であるため，樹木を簡易的にモデル化する必要がある．加えて，熱帯に位置する発展途上国などでは，維持管理費の面で比較的安価なマングローブと，堤防などのグレーインフラとを組み合わせた復興再建計画が進められている[3)]．

また，現地スケールにおけるマングローブの津波低減効果を示すには，数値計算による検討が不可欠である．Suzuki et al. (2019)[4)]は，オープンソースであるSWASHに，既存の垂直方向の植生円柱による抗力に加え，マングローブの複雑な根系によって発生する水平方向の抗力，空隙率，慣性効果を実装した．これを用いた計算と実験結果との比較により，数値モデルの妥当性が示され，また，植生密度が高いほど多孔質効果が大きくなり波を反射させることで，植生群内や背後地の波高の減少を手伝う．さらに慣性効果も大きくなり，負のエネルギー散逸が引き起こされることで植生の波浪減衰効果が低下することがわかった．しかし，課題として植生の柔軟性の係数などを挙げており，さらに改善が必要である．

このように，複雑な支柱根形状を持つ沿岸植生は，それゆえに生じる乱流や，抗力係数さらに柔軟性などを考慮する必要がある．そこで本研究では，まず実験でマングローブと嵩上道路の組み合わせによる津波低減効果を確認し，その後実務適用例のあるCADMAS-SURF/3Dを用いた数値シミュレーションにおいてマングローブを空隙率で簡易的に再現し，低コストでの計算手法の確立を目的とした．最後に現地適応計算を行い，周期の長い波に対する嵩上道路並びにマングローブの効果を確認した．

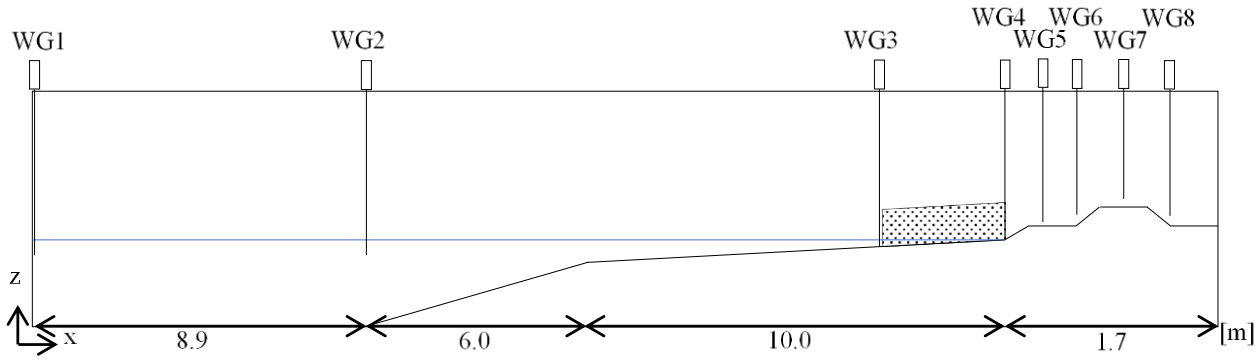

図-1　実験断面図

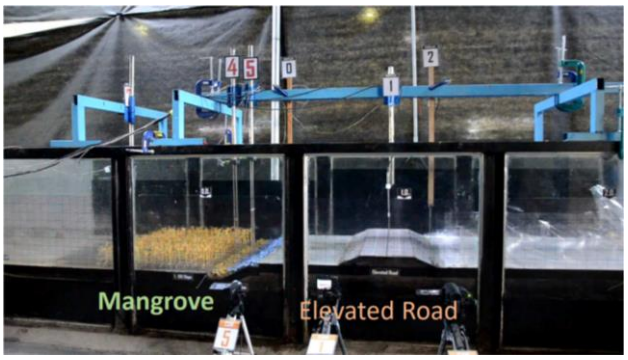

図-2　実験の様子

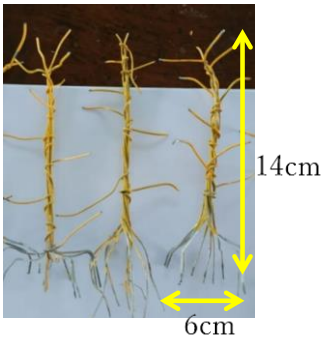

図-3　マングローブ模型写真

表-1　実験条件

Water Level (m)	Wave Height (m)	Mangrove Length (m)
0.4	0.07, 0.09, 0.11	なし 0.4 0.7 1.0
0.414	0.056, 0.076, 0.096	
0.428	0.07, 0.09, 0.11	

2.　実験条件

(1)　模型断面

本実験はインドネシアPUの二次元造波水槽を用いて行った．地形の様子ならびに計測器の設置位置を**図-1**に示す．**図-1**左端の造波板から8.9 m地点より勾配1/20の斜面が6.0 m，その後勾配1/100の斜面が10.0 m続き，この斜面の終点が平均海水面（以下MSL.と略）時の汀線となる．護岸を模した斜面の後水平床となる．その水平床には嵩上道路を設置し，天端高は0.05 mとした．また，縮尺は1/50である．実験の様子を**図-2**に示す．

(2)　植生模型

実験に使用した植生模型を**図-3**に示す．針金を用いてマングローブの根，幹，枝を再現した．模型の高さは約14 cm，幅は約6 cmである．隣り合う幹同士の間隔を5 cmとし，互い違いに設置した．マングローブ群の設置位置は，**図-1**の網掛け部分であり，MSL.時の汀線を右端として，造波板側に0.4 m，0.7 m，1.0 mの3ケースとした．

(3)　実験条件

表-1に実験条件を示す．現地スケールにおけるMSL.を20mとし，2018 年スラウェシ島地震発生時の水深を参考に，実験スケールにおける初期水深を0.4 m，0.414 m，0.428 mの3ケースとした．入射した孤立波の波高はMSL.によって異なり，水深に対し3ケースずつ検討した．マングローブ模型に関しては前節のように，岸沖方向幅3ケースに，設置しない場合を加えた計4ケースとした．

3.　数値計算の条件

(1)　数値モデル

CADMAS-SURF/3D[5]（以下CS3Dと略）を用いて再現計算を行った．基礎方程式は，3次元非圧縮性流体を対象とした連続式(1)

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x}+\frac{\partial \gamma_y v}{\partial y}+\frac{\partial \gamma_z w}{\partial z}=\gamma_v S_\rho \qquad (1)$$

およびNavier-Stokes方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した式(2)である．ここにはx方向のみ記載する．

$$\begin{aligned}\lambda_v\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x}+\frac{\partial \lambda_y vu}{\partial y}+\frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z}&=-\frac{\gamma_v}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}\\&+\frac{\partial}{\partial x}\left\{\gamma_x \nu_e\left(2\frac{\partial u}{\partial x}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{\gamma_y \nu_e\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right\}\\&+\frac{\partial}{\partial z}\left\{\gamma_z \nu_e\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right\}-\gamma_v D_x u-R_x+\gamma_v S_u\end{aligned} \qquad (2)$$

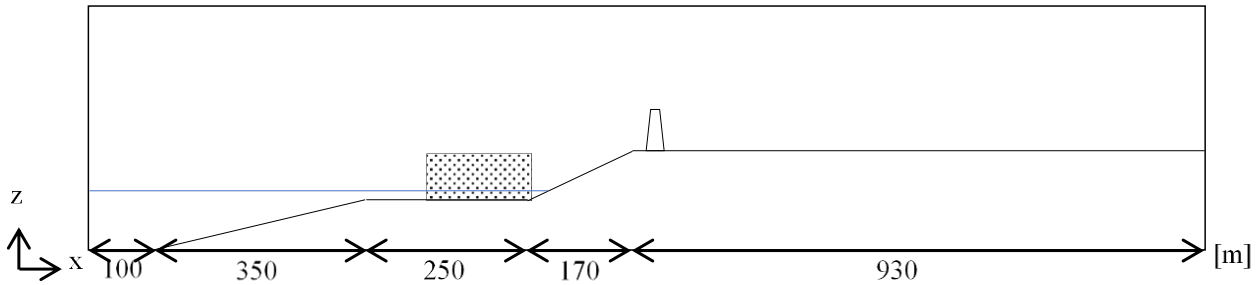

図-4　現地計算断面図

表-2　実験計算格子サイズ

	Range (m)	Grid Size (m)
x	0～20	0.5
	20～25	0.25
	25～28	0.1
	28～30	0.05
	30～56.6	0.02
y	0～1.0	0.02
z	0～1.0	0.01

表-3　既往実験計算格子サイズ

	Range (m)	Grid Size (m)
x	0～34.08	0.02
y	0～0.5	0.02
z	0～1.0	0.01

表-4　現地計算格子サイズ

	Range (m)	Grid Size (m)
x	0～1880	1.0
y	0～50	5.0
z	0～3	0.5
	3～15	0.1

ここで，t：時間，x, y：水平方向座標，z：鉛直方向座標，u, v, w：x, y, z方向の流速成分，ρ：規準密度，p：圧力，ν_e：分子動粘性係数νと渦動粘性係数ν_tの和，g：重力加速度，γ_v：空隙率，$\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$：$x, y, z$方向の面積透過率である．$\lambda_v, \lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$は$C_M$を慣性力係数とし式(3)のように表され，右辺第2項が構造物から受ける慣性力の効果となる．

$$\begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1-\gamma_v)C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1-\gamma_x)C_M \\ \lambda_y &= \gamma_y + (1-\gamma_y)C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1-\gamma_z)C_M \end{aligned} \tag{3}$$

D_x, D_y, D_zはエネルギー減衰帯のための係数，S_ρ, S_u, S_v, S_wは造波ソースのためのソース項である．また，C_Dを抵抗係数として多孔質からの抵抗力R_xは，式(4)のように流速の2乗に比例する形でモデル化される．

$$R_x = \frac{1}{2}\frac{C_D}{\Delta x}(1-\gamma_x)u\sqrt{u^2+v^2+w^2} \tag{4}$$

ここで，Δxはx方向の格子間隔である．

(2)　実験再現計算

表-2に，2章に記載した実験の再現計算時の格子サイズを示す．造波ソースを用いて造波し，$x-$側に進んだ波の境界での反射を防ぐために，水槽左端は開境界とし，造波位置まで30 mの距離をとった．入射する孤立波は，式(5)を用いてマトリクスデータを作成した．

$$\eta(x,t) = Hsech^2\left(\sqrt{\frac{3H}{4h^3}}\left(x-\sqrt{g(h+H)}t\right)\right) \tag{5}$$

ここで，x：水平方向座標，t：時間，H：波高，h：水深，g：重力加速度である．

また，マングローブは領域に一定の空隙率を掛けることで再現した．空隙率は，実験に使用した模型を参考に0.97とし，比較のために0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 0.95としたケースも検討した．

(3)　既往実験再現計算

次に，田所ら(2020)[6]の実験の再現計算を行った．**表-3**に格子サイズを示す．前節の実験再現計算と入射波高が類似しているため，格子サイズも等しく設定した．マングローブのモデリング方法として，田所ら(2020)[6]は，マングローブ群を24本の円柱で再現し実験と再現計算を行ったが、本検討では前節と同様，領域に空隙率0.97，抗力係数CDを与えて再現した．ここでは，CDによる計算結果の違いを確認するために，2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0の5ケースを検討した．また，乱流モデルを使用した．

(4)　現地計算

(2)の再現計算結果を受けて，現地スケールでのマングローブ並びに嵩上道路の津波減衰効果を確認するために現地スケールでの数値計算を行った．**表-4**に，現地計算の格子サイズを，**図-4**に地形の様子を示す．水深は3.7mである．網掛け部分にマングローブを設置し，陸地部分には，実験と同じ規格の嵩上道路を設置した．造波ソースを用いて造波し，入射する孤立波は，2018年スラウェシ島地震時の波形を参考にし，波高2.5 m，周期210 sのsin波を使用した．

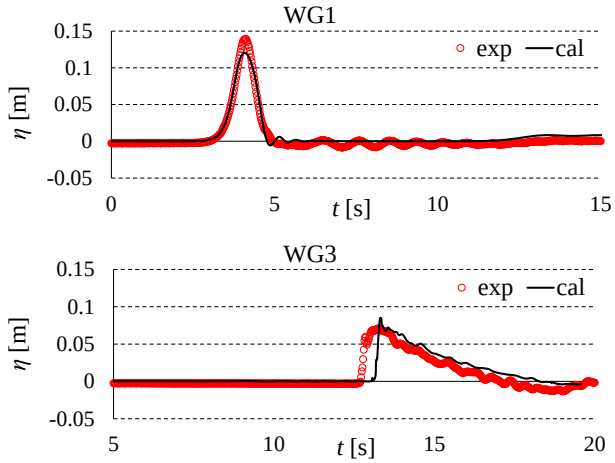

図-5　時系列波高

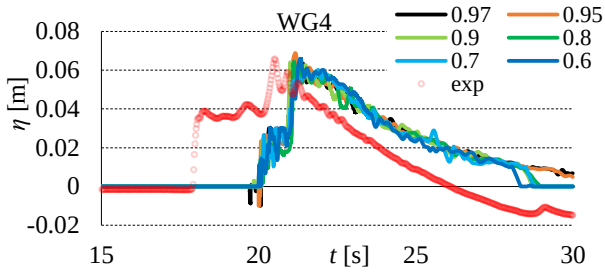

図-6　WG4 における時系列波高

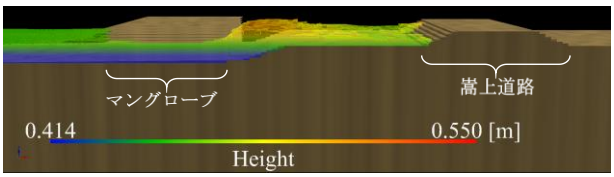

図-7　スナップショット

4.　結果の考察

(1)　水理実験と数値計算の比較検討

図-5に，水深0.414 m，マングローブなし，波高0.056 mのケースでの，WG1とWG3における実験と計算の時系列波高を示す．数値計算結果は，波形ならびに最大波高に関して実験とよく一致したことがわかるため，本検討においてCS3Dの妥当性が示された．

図-6に，水深0.4 m，マングローブ長さ0.4 m，波高0.07 mのケースでの，各空隙率のマングローブ直後に設置したWG4における時系列波高を示す．赤い丸で示された実験波形に着目すると，18～20 sに見られる第1波と，20 s以降の水面変動量が最大になる第2波に分けられる．第1波は，反射波がWG4に到達する前の波である．一方，第2波は，マングローブ背後にある護岸や嵩上道路による反射波が反映されていることがわかる．図-7で示したスナップショットでは，WG4に第2波が到達している様子がわかる．図-6において線で示されている

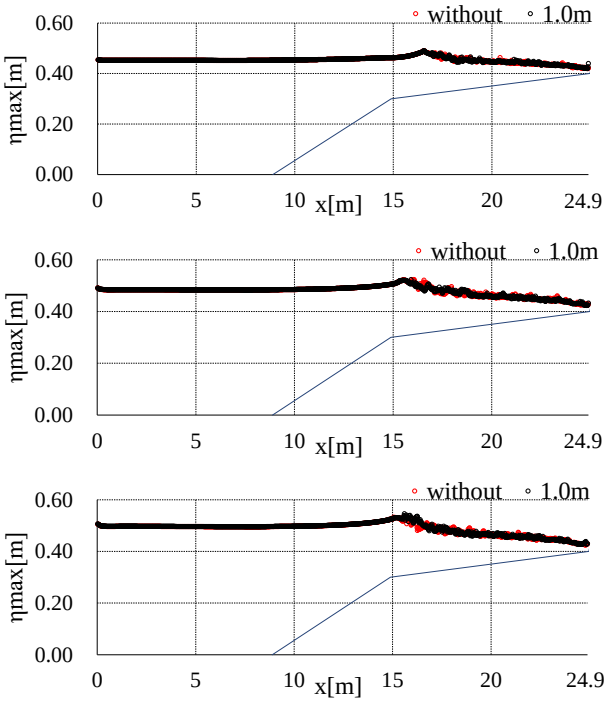

図-8　空間分布波高

（上：波高 0.07m，中：波高 0.09m，下：波高 0.11m）

計算結果に着目すると，空隙率0.60 と0.70における第1波は0.60 の方が小さい波高をとっているが，その差はごく微小である．最大波高を与える第2波を見ると，計算結果にほとんど差がないことから，空隙率の違いはほとんど計算結果に影響しないことがわかる．また，実験に比べて，計算結果の位相遅れが確認できる．これについては，さらなる検討が必要であり，今後の課題としたい．

図-8に，マングローブがない条件と，空隙率0.97 として再現した長さ1.0 mの条件において，横軸に造波板からの距離，縦軸に計算時間内での最大水深をプロットした図を示す．なお，ここでは反射の影響を除くため，図-6における第1波での最大波高をとっている．またこのグラフには，造波板から汀線までの地形も記載している．図-8より，斜面によって砕波している様子，並びに，波高が大きくなるにつれて砕波点が造波位置に近づいていることが確認できる．マングローブは長さ0.4 m, 0.7 m, 1.0 mの3 ケースすべて砕波帯内に位置していることがわかる．田所ら(2020)[6]より，Re数が大きくなるとC_Dは一定の値をとり，その平均値は約2.0であることがわかるが，本検討でも砕波帯内でRe数が大きくなり，マングローブのC_Dが小さくなり，抗力が小さくなるため，マングローブによる津波減衰効果が見られなかったと考えられる．また，波長に対してマングローブ長さが短いことも，津波減衰効果が確認できなかった原因と考えられる．砕波帯内において減衰効果が確認できるマングローブ長さ

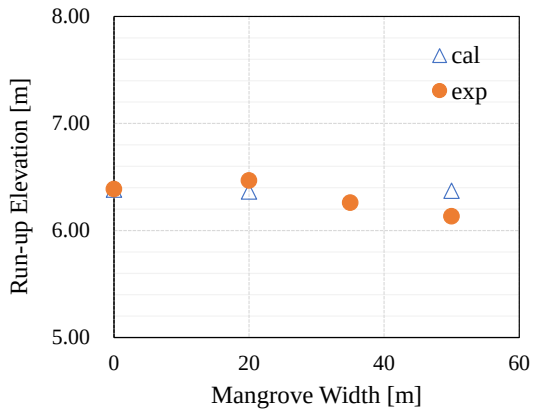

図-9　嵩上道路前の Run-up Elevation

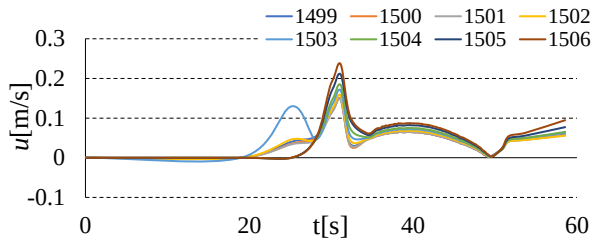

図-10　護岸上の流速

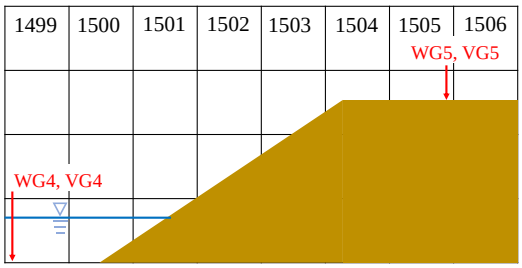

図-11　流速計測点

を検討する必要がある．

図-9に，嵩上道路直前のWG6における現地スケールでの，実験値と計算値の遡上高を示す．実験では，マングローブの岸沖方向幅が大きくなるにしたがって，津波遡上高は減少傾向にあり，マングローブなしの条件から最大5%減少している．一方数値計算では，マングローブの津波低減効果は確認できなかった．実験で減衰効果が得られたのは，マングローブ一本一本を再現した模型による多重反射の影響があると考えられる．

図-10に，マングローブ直後の護岸を遡上する進行波の流速を示す．グラフの凡例はセル番号を示しており，図-11に対応している．防波堤の耐津波設計ガイドライン[7]に記載されているイスバッシュ式(6)から，許容される流速値を求める．

$$M = \pi\rho_r U^6/48g^3y^6(S_r-1)^3(cos\theta - sin\theta)^3 \qquad (6)$$

ここで，M：石の質量，ρ_r：石の密度，U：流速，y：イスバッシュ数，S_r：石の水に対する比重，θ：斜面勾配である．$M = 0.8t$としたとき求められる流速の最大値は0.67 m/sであり，グラフと比較すると，護岸の安全性が確認できる．

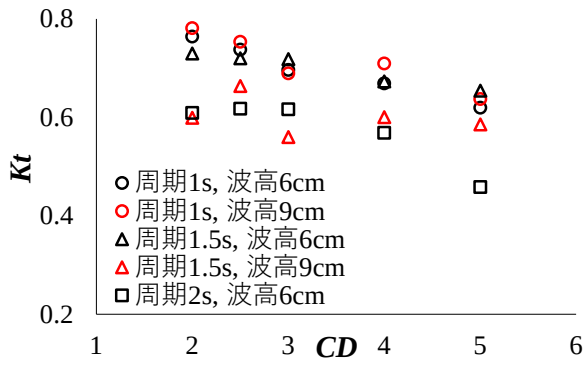

図-12　減衰率と Cd のグラフ

図-13　嵩上道路による津波低減効果

(2)　既往実験再現計算

図-12に，水深0.45 mのケースにおける，マングローブの透過率とC_Dの関係について示す．ここで，透過率K_tは式(7)を用いて算出した．

$$K_t = \frac{\eta_{iWG3}}{\eta_{iWG2}} \qquad (7)$$

ここで，η_{iWG2}：WG2における入射波高，η_{iWG3}：WG3における入射波高である．

全体の傾向をみると，C_Dが大きくなるにつれて透過率が下がっていることから，マングローブの波高減衰効果が大きくなっていることがわかる．しかし，周期1 s，波高9 cmのケースは，C_Dが4のとき，周期1.5 s，波高9 cmのケースは，C_Dが2.5，4のとき，透過率が上昇している．また，周期1.5 sのケースで比較すると，波高が大きい方が透過率が大きくなっている．

また，田所ら(2020)[6]の透過率の結果と比較すると，この数値計算においてはマングローブの再現の際に用いるC_Dは2.0 ～ 2.5が妥当だと考えられる．しかし，実現象においては，木の配置方法の違いによって透過率が変化することがわかっているため，多重反射や配置方法によってモデリング方法を変える指標について，さらなる検討が必要である．

(3)　現地計算

図-13に，嵩上道路による津波低減効果のグラフを示す．縦軸は，嵩上道路直後（造波位置から930 m）で計測した時系列波高の平均値から流量を算出したものである．マングローブと嵩上道路を組み合わせることで，マングローブのみの条件よりも波の低減効果が高いことがわかる．また，この計算では，マングローブのみの場合でも、津波低減効果が確認される．これは，マングローブ長さ250 mが，波長に対して十分に長かったためと考えられる．

7. まとめ

(1)実験の再現計算では，波形をよく再現できたことから，CS3Dによる計算で妥当性が得られることがわかった．一方，マングローブによる津波低減効果について，実験では低減率と岸沖方向幅は比例関係にあったが，数値計算では低減率がほぼ横ばいであり，その効果は実験よりも過小評価となったものの，全体的には実験と整合した結果が得られた．

(2)2018 年インドネシア・スラウェシ島地震で観測された波形を入射波形として用いた現地スケールでの計算では，マングローブと嵩上道路を組み合わせると，マングローブのみのケースよりも約1.8 倍の津波低減効果があることがわかった．

(3)本検討では，領域に空隙率や抗力係数を与えることでマングローブを再現した．木を一本一本再現する場合に比べ，多重反射の影響が見られないので，その部分の再現が今後の課題である．

参考文献

1) 柳澤英明, 宮城豊彦, 馬場繁幸: 2009 年サモア地震津波におけるマングローブ 林の津波減災効果, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No.1, pp. 251-255, 2010.
2) C. W. CHANG, MORI, N., TSURUTA, N., and SUZUKI, K.: Estimation of Wave Force Coefficients on Mangrove Models, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B2 (Coastal Engineering), Vol.75, No.2, pp.I_1105-I_1110, 2019.
3) JICA: 津波・液状化地すべり（沿岸部）に関する国内支援委員会技術検討書, インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト.
4) SUZUKI, T., Zhan HU, KUMADA, K., L. K. PHAN, Marcel Z: Non-hydrostatic modeling of drag, inertia and porous effects in wave propagation over dense vegetation fields, Coastal Engineering, 149, pp. 49-64, 2019
5) 有川太郎, 山田文則, 秋山実: 3 次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討, 第 52 回海岸工学講演会論文集, pp.46-50, 2005.
6) 田所彩花, 渡部真史, 有川太郎: 砕波時における海岸林による波高減衰効果の数値モデリング手法の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 76, No.2, pp. I_955-I_960, 2020.
7) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 平成 25 年 9 月（平成 27 年 12 月 一部改訂）, 2015

(Received March 17, 2021)
(Accepted July 22, 2021)

NUMERICAL MODELING OF TSUNAMI ATTENUATION EFFECT WITH MANGROVE

Ayaka TADOKORO, Adi PRASETYO, Shin MURATA, Masashi WATANABE, and Taro ARIKAWA

Coastal vegetation, such as coastal forests and mangroves, has been focused on its mitigation effects as green infrastructure. However, the current numerical calculation speeds do not allow for detailed modeling of vegetation with complex root structures. In this study, we aimed to establish a low-cost calculation method for mangroves by using the porosity. The validity of the method was verified by comparing with physical experiments, and the disaster mitigation effect of a raised road was examined using the cross-sectional shape of the local site. The numerical results are consistent with the experimental results, although they are slightly underestimated.