

令和元年5月20日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16373

研究課題名（和文）津波による侵食を考慮した防潮堤と海岸林による多重防護対策に関する研究

研究課題名（英文）TSUNAMI MITIGATION EFFECT BY COASTAL EMBANKMENT AND COASTAL FOREST WITH LOCAL SCOURING

研究代表者

飯村 耕介（IIMURA, Kosuke）

宇都宮大学・地域デザイン科学部・助教

研究者番号：30642128

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：レベル2津波に対しては、防潮堤、海岸林、砂丘や運河などの複数の対策を組み合わせた多重防護による対策が必須である。本研究では、水理模型実験により多重防護下における構造物周辺の流況や背後地における減災効果、防潮堤裏法尻における洗掘孔への影響を確認した。また、数値解析により第1波によって防潮堤裏法尻に生じた洗掘孔や、防潮堤と海岸林の間に配置された掘状の構造物が背後の海岸林や津波減災効果に与える影響について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レベル2津波に対しては多重防護による津波減災効果だけでなく、多重防護を構成する構造物への被災や粘り強さを評価する必要がある。特に防潮堤、防波堤単体での検討は進んでいるものの、本研究では海岸林と防潮堤による多重防護下における、防潮堤裏法尻での侵食メカニズムや減災効果の変化について明らかにした。今後発生しうる最大規模の津波に対する減災対策を取るうえで非常に重要な知見となる。

研究成果の概要（英文）：The Great East Japan Tsunami destroyed the coastal embankments because of local scouring behind embankment induced by tsunami overflow. For tsunami mitigation, suitable arrangement of multiple tsunami measure structures is very important. The objective of this study is to estimate effect of a combined position of coastal forest and embankment on tsunami flow pattern, fluid force acting on tree and scouring behind coastal embankment by the hydraulic model experiments. Moreover, tsunami mitigation effect by local scouring is estimated by the numerical simulations.

研究分野：津波防災

キーワード：津波 減災 海岸林 防潮堤 洗掘 多重防護

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴って発生した津波は従来の想定を上回る巨大なもので、東北地方を中心とした太平洋沿岸地域に深刻な被害を与え、日本の津波対策の考え方を変えるきっかけとなった。特に、巨大津波であるレベル2津波に対しては被害を最小限に抑える『減災』の考え方が示され^①、越流する津波に対して粘り強く耐えることが出来る防潮堤や、複数の対策構造物を組み合わせた多重防護などが必要だとされている。防潮堤が破壊された主な原因として、堤防を越流した津波によって裏法尻が侵食され、その洗掘孔から防潮堤内の土砂が吸い出されることにより破壊に至る^②ことが分かっている。そのため、防潮堤などの構造物を越流するようなレベル2の津波に対しては、複数の対策を組み合わせた多重防護による段階的な津波減災による背後地の保護と同時に、越流による防潮堤の破壊を抑えるためには、構造物を粘り強く耐えるように強靱化する必要がある。

2. 研究の目的

海岸林の持つ流れの減勢効果に着目し、多重防護として防潮堤周辺に配置された海岸林による侵食メカニズムや背後地域への減災効果の変化について、津波を模した段波を発生させる水理模型実験と数値解析により、以下のことを明らかにする。

- (1) 防潮堤と海岸林を配置したときの防潮堤周辺、特に侵食の大きくなる裏法尻部や海岸林前面部における流況を明らかにし、海岸林を配置することで流勢が緩和することによる侵食メカニズムの変化について砂を用いた移動床実験により明らかにする。
- (2) 海岸林を配置することで、防潮堤裏法尻部流勢と侵食を低減し、防潮堤が粘り強く耐えることができる効果的な海岸林の規模や配置方法を明らかにし、そのときの背後地域における津波減災効果について明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) 防潮堤と海岸林を組み合わせた多重防護対策に着目し、水路内に防潮堤模型と海岸林模型を配置した水理模型実験を行い、固定床実験においては防潮堤と海岸林の配置方法の違いによる構造物周辺の詳細な流況と海岸林に作用する流体力への影響を、移動床実験においては防潮堤と海岸林の配置方法の違いや防潮堤の高さの違いによる防潮堤背後の洗掘現象を明らかにする。実験における模型の配置方法を図-1に示す。実験スケールは1/100縮尺程度を想定し、防潮堤模型の天端幅は3cm、高さは3、4、5cmの3ケースとし、法面の勾配を1/2とした。海岸林模型はクロマツを想定し、直径2mmの円柱を密度1372本/m²となるように正形状に配置した。また、移動床は6号珪砂を用いている。

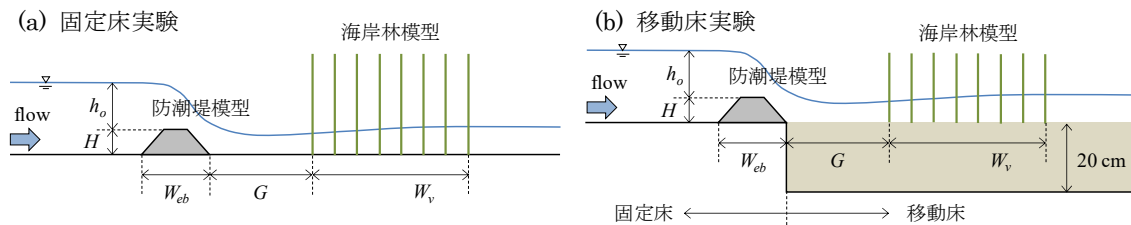


図-1 実験模型配置方法の概要

- (2) 現地スケールにおける防潮堤裏法尻に形成された洗掘孔を含んだ多重防護対策による津波減勢効果について、数値解析により明らかにする。解析モデルの再現性は実験結果と比較することで行った。数値解析に用いる基礎方程式は水深積分型の準二次元非線形長波方程式とした。連続式を式(1a)に、運動方程式を式(1b)にそれぞれ示す。なお、 t は時間、 x は縦断方向座標、 A は流水断面積、 Q は流量、 g は重力加速度、 ζ は水位、 B は水路幅、 ρ は水の密度、 n はマンニングの粗度係数、 R は径深、 γ は海岸林密度、 C_D は海岸林の抗力係数、 d は海岸林の胸高直径、 h は静水深である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \zeta}{\partial x} = - \frac{Bgn^2 Q}{R^3} \frac{Q}{A} \left| \frac{Q}{A} \right| - \frac{1}{2} \gamma BC_D d (h + \zeta) \frac{Q}{A} \left| \frac{Q}{A} \right| \quad (1b)$$

数値計算は基礎式を差分式に変換して行う。差分化の方法等は基本的に既往研究^③に従って行うが、本実験における造波波形は段波状に急激に水位が上昇しているため、移流項の差分をKK-Scheme^④を用いて行った。また、現地スケールにおける地形条件は宮城県仙台市若林区を参考に、簡略化したモデル地形を用いることとし、防潮堤の天端高さは基準面D.L.から+5.4m、海岸林については実験と同様に想定樹木がクロマツで、樹高は9.6m、胸高直径0.15m、海岸林密度0.2本/m²とした。海岸林の配置位置は汀線から300m地点を始点に海岸林幅が600mとなるように配置した。

4. 研究成果

本研究における代表的な成果を以下の項目に示す。

- (1) 防潮堤と海岸林の組み合わせによる多重防護下の流況について図-2に示す。Case-A1は防潮堤の下流側に海岸林を隣接させたケース、Case-B1は防潮堤の上流側に海岸林を隣接させたケースで、Case-A2とCase-B2はそれぞれの配置順で防潮堤と海岸林の距離 G を50cmとした条件となる。配置Case-Aでは上流側にある防潮堤が流れを堰き止めることで水位が大きく上昇し、防潮堤越流時に水位が減少するものの、下流側にある海岸林の堰き止め効果もあり、防潮堤越流時の水位減少は配置Case-Bに比べて小さい。また、防潮堤越流後では海岸林の内部で大きく水位が低減していく。模型間距離を離れた条件では、防潮堤越流時の水位減少は大きくなるが、海岸林内部の水位減少や模型背後の水位には大きな影響は見られない。配置Case-Bにおいては、上流側にある海岸林による流れの堰き止め効果により海岸林前面で水位が大きく上昇する。一方で、海岸林内部での水位減少は海岸林背後の防潮堤による堰き止め効果により小さくなっているが、防潮堤越流前後の水位の変化はCase-Aに比べて大きくなっている。

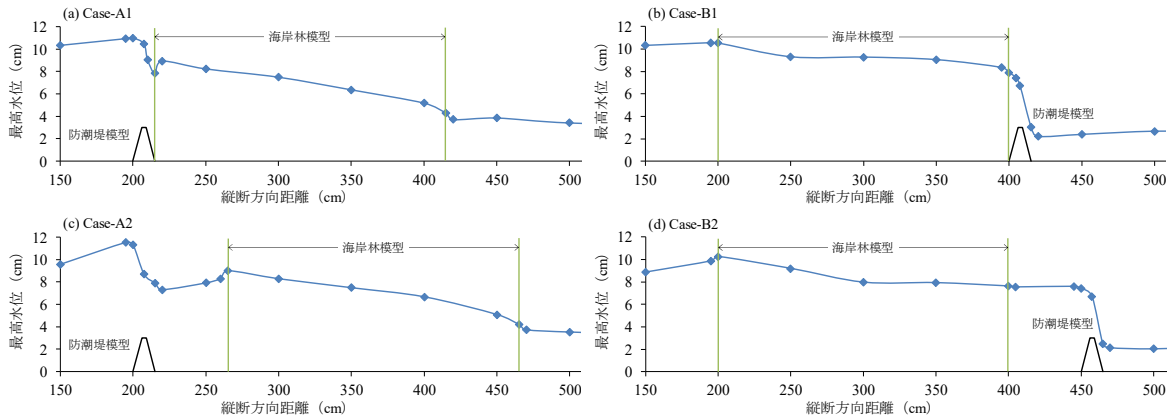


図-2 固定床実験における流況（最高水位）

- (2) 防潮堤と海岸林の組み合わせによる多重防護対策による背後地の減勢効果について、図-3に示す。海岸林への作用力については、配置Case-Bでは、防潮堤よりも海岸林が上流側にあり、津波の流れはまず海岸林に作用するため海岸林のみを配置した場合と同じような作用力の分布となる。配置Case-Aでは防潮堤越流後の流れが海岸林に作用する。越流時に流れは加速するものの浸水深は小さくなり、防潮堤が津波を反射する影響もあり、全体的に海岸林への作用力は他のケースに比べて小さくなっている。模型背後の減勢効果の確認のため、水路下流端に勾配1/10の斜面模型を設置し、遡上高を測定した。模型を配置したケースでは、模型なしに比べて遡上高はおおよそ半分程度となっている。最も遡上高が小さくなったのはCase-B2で、海岸林への作用力が大きく、また防潮堤が海岸林の背後にあり、海岸林によって減勢された津波が防潮堤にあたるため、遡上高の軽減効果が大きくなったと考えられる。

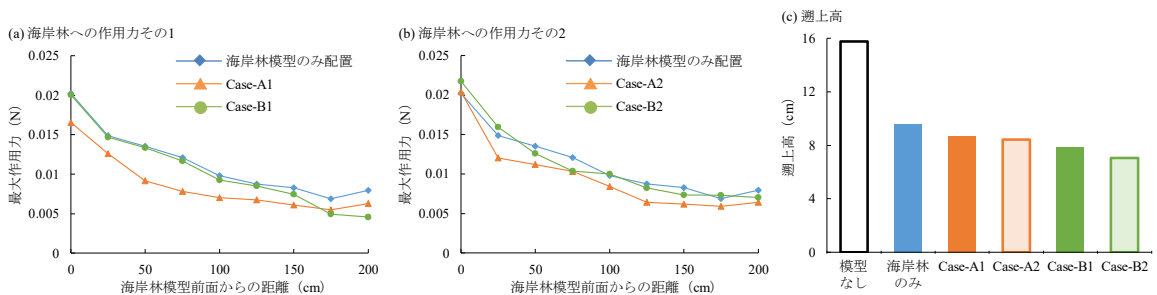


図-3 固定床実験における海岸林への作用力と遡上高

- (3) 多重防護下における防潮堤裏法尻の洗堀への影響について、移動床実験により明らかにした。図-4に砂面と水面の時間変化、図-5に流れのPatternと洗堀孔の発達についてそれぞれ示す。防潮堤のみを配置したケースでは、時間の経過とともに防潮堤裏法尻における洗堀孔が拡大していく様子が見られた。また、洗堀孔のすぐ背後から下流方向に長い範囲で砂の堆積が見られた。越流開始から90秒後における最大洗堀深は7.8cm、堆積範囲の最大砂面高は2.0cmとなった。防潮堤と海岸林を配置したCase-A1では、海岸林の抵抗により防潮堤背後における水深が増加し、越流する際の流速が低減することで、防潮堤裏法尻部における洗堀孔の拡大が抑えられている。また洗堀孔背後の堆積は海岸林内の流速低減の影響を受け、海岸林の前面部に集中して堆積しており、流れ方向の体積長さは短くなっている。越流開始から90秒後における最大洗堀深は3.0cm、堆積範囲の最大砂面高は2.1cm

となった。防潮堤と海岸林の距離を離れた Case-A2 では、海岸林の設置位置が下流側にずれるものの、越流した流れが海岸林前面での反射や堰き止めの影響を受け、防潮堤背後における水深は Case 3-A1 同様に増加し、洗堀孔の拡大も抑えられている。しかし、洗堀孔位置の海岸林抵抗がなくなったため、最大洗堀深は 3.22 cm で Case 3-A1 と比べてわずかに大きい。防潮堤裏法尻における洗堀孔の発達に対する防潮堤背後の流況の影響を確認するため、流れの Pattern を分類し、洗堀過程での変化を確認した。Pattern 1 流れでは、防潮堤を越流した流れが洗堀孔に沿って流れ、洗堀孔内の土砂を下流側に輸送し、洗堀孔を拡大していく。Pattern 2 流れでは、洗堀孔がある程度拡大し、防潮堤背後の水深も大きくなるため、流れの主流部が洗堀孔の最深部まで潜り込まずに洗堀孔下流側の斜面に衝突する。この流れのときは洗堀孔の深さよりも幅が拡大する。最後の Pattern 3 流れでは、さらに防潮堤背後の水深が大きくなり、流れの主流部が水面付近に現れる潜越流状態となり、洗堀孔内の流速が非常に小さくなるため、洗堀孔の発達は止まる。越流開始時は Pattern 1 流れとなり、防潮堤背後の土砂を下流側へ輸送し、洗堀孔が発達していく。その後 Pattern 2 流れに遷移して洗堀深の拡大は若干緩やかに変化するようになる。海岸林を組み合わせることで、海岸林前面部における堰き止め、反射の効果によって防潮堤背後の水深が大きくなり、海岸林がないケースに比べて早い段階で Pattern 3 の流れに遷移させることができ、洗堀孔の拡大を抑えることができることが分かった。

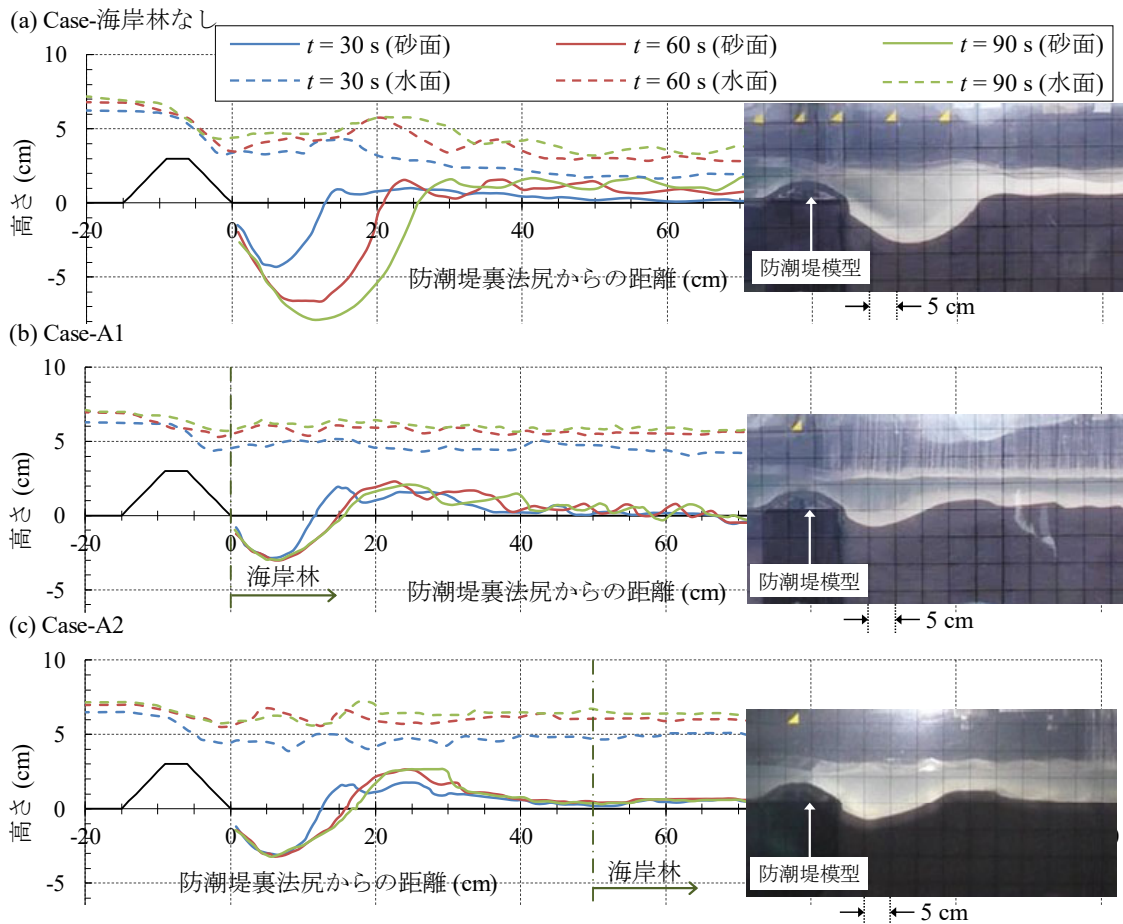


図-4 移動床実験における砂面と水面の時間変化

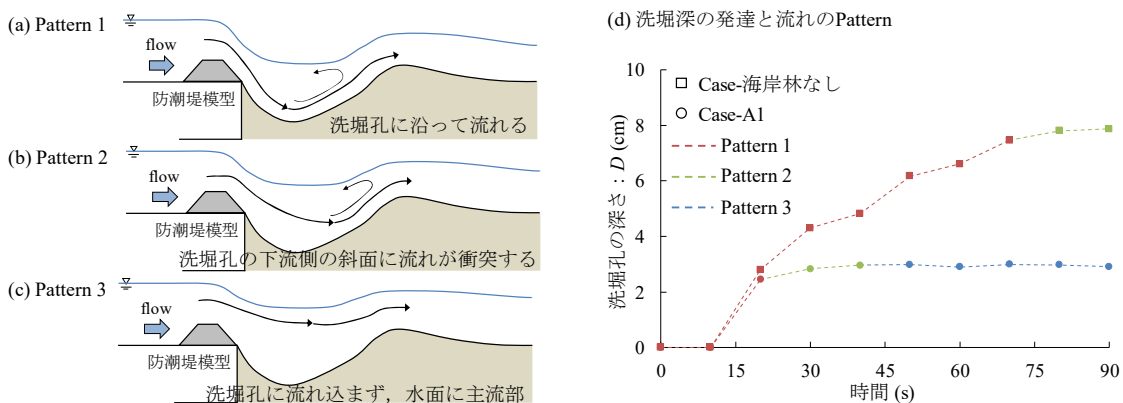


図-5 流れの Pattern と洗堀深の発達過程

- (4) 現地スケールにおける洗堀孔を含めた多重防護による津波減災効果について、**図-6**に地形条件と模型の配置方法、**図-7**に実験結果との比較による解析モデルの再現性の確認、**図-8**に現地スケールにおける津波遅延時間に着目した減災効果をそれぞれ示す。まず解析モデルの妥当性を通常の風上差分と比較して確認した。模型配置の有無にかかわらず、風上差分の解析結果においてスパイク状のノイズが見られた。これは段波状の波を対象とした解析で、波の先端部は水位が急激に上昇するため解析が不安定になったためだと考えられる。一方で、3次精度風上差分であるKK-Schemeでは、水位上昇が急な波の先端部においても不安定な解析とはならず、時間波形および最大水位の空間分布においても造波波形の良好な再現性を有していることが確認できた。このKK-Schemeを用いた解析モデルを用いて、洗堀孔が背後地の減勢に与える影響について検討するために現地スケールでの数値解析を行った。背後地における減災効果について、特に津波の遅延時間に着目した。**図-8**に各計算条件における汀線から1000 m地点での水位の時間変化を示している。洗堀孔についてはそのサイズを変化させて解析を行い、比較対象として洗堀孔を配置せず、海岸林の幅を変化させた場合の図も示している。図中の D は洗堀深、 L は洗堀幅をそれぞれ示している。今回の検討ケースは洗堀孔内に初期から水がある条件で解析を行ったため、洗堀孔の大きさによる違いは出にくかったと考えられる。いずれのケースも洗堀孔がない場合に比べて20秒程度の遅延効果が確認された。これはおおよそではあるが、洗堀孔が海岸林幅100 mに相当する程度の津波遅延効果を持つことが分かった。

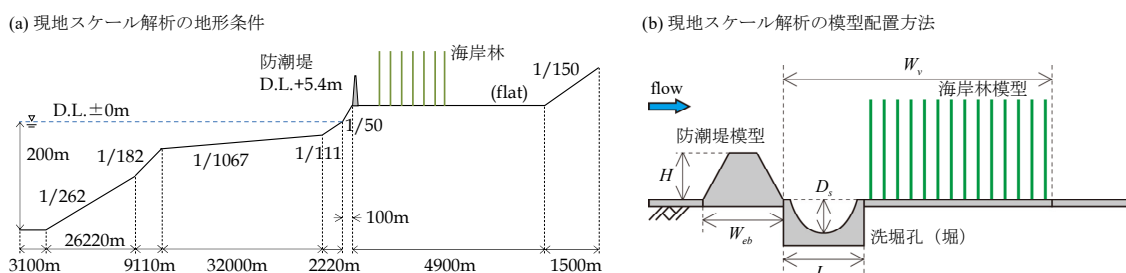


図-6 現地スケール解析の地形条件と模型配置方法

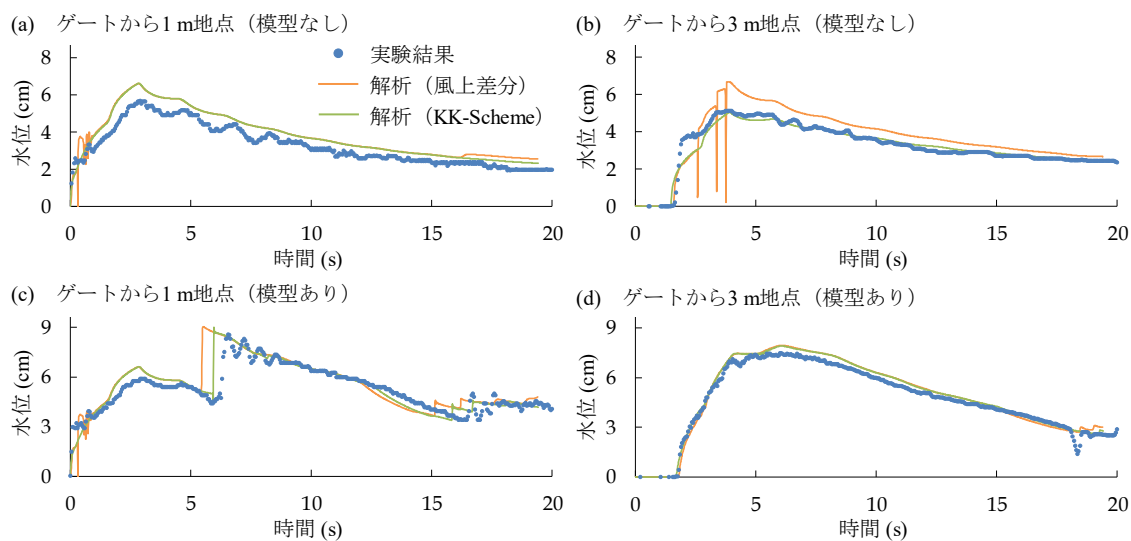


図-7 解析モデルの精度確認 (実験結果との比較)

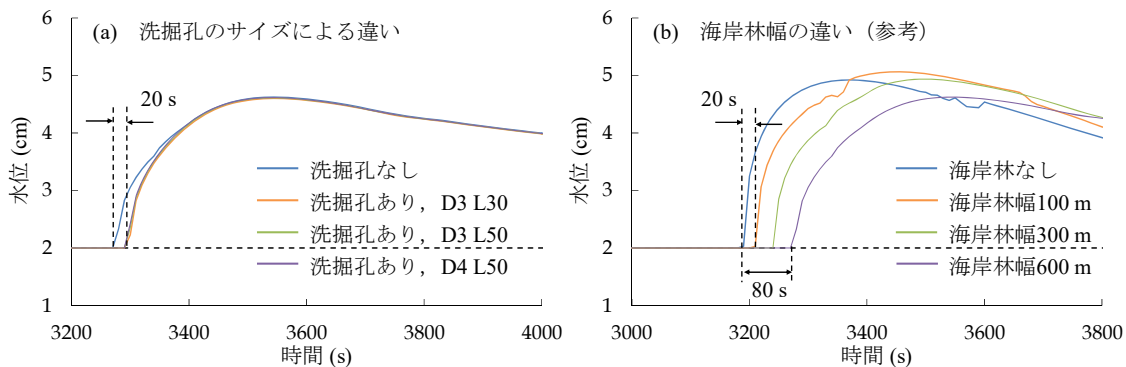


図-8 背後地 (汀線から1000 m地点) での津波水位と遅延時間

<引用文献>

- ① 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告（オンライン），<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/index.html>，参照 2019-5-19.
- ② 加藤史訓，野口賢二，諏訪義雄，木村晃，河合雅史，高木利光，小俣雅志：東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野南部での海岸堤防被災・洗掘に関する調査，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp.I_1396-I_1400，2012.
- ③ 谷本勝利，田中規夫，N.B. Thuy，N.A.K. Nandasena，飯村耕介：津波遡上に対する海岸樹林内通路の影響－2次元数値計算による検討－，海洋開発論文集，第24巻，pp.87-92，2008.
- ④ Kawamura, T., Kuwahara, K.: Computation of High Reynolds Number Flow Around a Circular Cylinder with Surface Roughness, AIAA Paper 84-0340, 1984.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計6件）

- ① 飯村耕介，高橋勇貴，池田裕一，佐藤夏海：防潮堤と海岸林による多重防護の津波減災に防潮堤裏法尻の洗掘孔が与える影響，土木学会論文集 B3（海洋開発），査読有，Vol.75，No.2，2019（印刷中）.
- ② 飯村耕介，佐藤夏海，池田裕一：防潮堤背後の海岸林が津波越流時の洗掘現象に与える影響に関する実験，土木学会論文集 B2（海岸工学），査読有，Vol.74，No.2，pp.I_343-I_348，2018.
- ③ limura, K., Ikeda, H., Takahashi, Y. and Sato, N.: Numerical simulation for tsunami mitigation effect by local scouring behind coastal embankment and coastal forest, Proceedings of the special session on Disaster Risk Reduction, 9th International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE) 2018, 査読無, pp.92-97, 2018.
- ④ limura, K., Sato, N. and Ikeda, H.: Experiments for effects of coastal forests on scouring behind coastal embankment induced by tsunami overflow, Proceedings of the 12th International Symposium on Ecohydraulics, 査読有, ID 2562767, 2018.
- ⑤ 飯村耕介，高橋勇貴，野崎樹，池田裕一：防潮堤と海岸林の位置関係が段波津波の流況と海岸林に作用する流体力に与える影響，土木学会論文集 B2（海岸工学），査読有，Vol.73，No.2，pp.I_385-I_390，2017.
- ⑥ 飯村耕介，野崎樹，高橋勇貴，池田裕一：津波の流況と海岸林の抵抗力に防潮堤と海岸林の位置関係が与える影響に関する実験的研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），査読有，Vol.73，No.2，pp.I_480-I_485，2017.

〔学会発表〕（計5件）

- ① 高橋勇貴，飯村耕介，池田裕一，佐藤夏海：防潮堤裏法尻の洗掘孔が防潮堤と海岸林による多重防護の津波減災に与える影響，第46回土木学会関東支部技術研究発表会，2019.
- ② 高橋勇貴，飯村耕介，池田裕一：防潮堤と海岸林の配置方法の違いが防潮堤背後の洗掘に与える影響に関する基礎的数値解析，第45回土木学会関東支部技術研究発表会，2018.
- ③ 佐藤夏海，飯村耕介，池田裕一：津波越流時の洗掘現象に防潮堤背後の海岸林が与える影響に関する実験的研究，第45回土木学会関東支部技術研究発表会，2018.
- ④ 高橋勇貴，飯村耕介，池田裕一，野崎樹：防潮堤と海岸林による多重防護が段波津波の流況および樹木抵抗に与える影響に関する実験的研究，第44回土木学会関東支部技術研究発表会，2017.
- ⑤ 野崎樹，飯村耕介，池田裕一，高橋勇貴：防潮堤と海岸林の位置関係が流況と樹木抵抗に与える影響に関する実験的研究，第44回土木学会関東支部技術研究発表会，2017.

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：池田 裕一

ローマ字氏名：IKEDA Hirokazu

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。