

## 海岸樹林帯前後の多重防御構造がもたらす減勢効果の実験的検討

埼玉大学 学生会員 ○君和田 祐弥

埼玉大学大学院 学生会員 座波 健仁

埼玉大学大学院（兼）埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター 正会員 田中 規夫

### 1. 研究背景と目的

2011 年の東北地方太平洋沖地震による津波は、沿岸部の広範な地域において家屋や海岸林等に甚大な被害をもたらした。海岸堤防の限界と津波災害を受け、国土交通省は数百年から千年に 1 度の頻度で発生するその地点で想定される最大規模の津波をレベル 2 津波と設定し、レベル 2 津波に対しては、減災を目標とした多重防御という考え方が推進されるようになった。

北海道地方では、2011 年の津波災害を機に海岸防災対策の見直しがなされ、白糠郡白糠町において既存の海岸林の背後に、堀、堤防を用いた多重防御構造が津波シミュレーションによって有効とされ<sup>1)2)</sup>、構造物も構築された。また、海岸林の前側を利用する多重防御構造も提案されている<sup>2)</sup>。樹林帯周辺の土地利用状況が異なる他地点にも拡張して行くためには、様々な多重防御構造に対し、減勢効果を様々な津波条件、樹林帯条件において、定量的にその効果を評価し、設計論として高めていくことが求められている。

多重防御に関する研究として、堤防と樹林帯<sup>3)</sup>、堤防と杭群<sup>4)</sup>、二重堤防構造<sup>5)</sup>、など多重防御の研究が行われている。しかし、様々な組合せの中で、反射効果の増大や跳水現象の有効活用などの物理現象についての研究が不足しており、津波減勢効果の一般化にむけて系統的な実験が必要である。

そこで本研究では海岸樹林帯前後に多重防御を作成できるスペースが有る場合を想定し、樹林帯と堀、堤防を組み合わせた多重防御構造の水理模型実験の中で、どの多重防御構造が津波減勢に最も効果的なのかを明らかにする。

### 2. 研究方法

空圧式造波ゲートの急開により段波を発生させることが可能な全長 18 m、幅 0.4 m の水路（図-1）を実験に使用した。水路内にはゲートから 4.5 m-5.05 m の位置に

1:10 のぼり勾配のスロープと、スロープから下流側は水平となるような実験床を設置した。

実験模型として、木製の円柱から作成された樹林帯模型と、木製の堀模型、木製の堤防模型を使用した。参考となる仙台平野の樹林帯は樹木直径が 0.2~0.3 m、樹木密度は 0.20 本/m<sup>2</sup> である。これを参考に樹林帯模型は、杭直径(D)を 4 mm、杭高さを 18 cm、樹林帯幅を 40 cm、樹木中心軸間距離を 2.3 cm として、正三角形千鳥配列で配置した。樹林帯密度は 0.22 本/cm<sup>2</sup> である。この形状で、流下方向に 40 列の樹林帯模型を配置した。堀模型は幅 0.4 m、堀深さ 5.3 cm、法面勾配を 1.6 割勾配とし、堤防模型は幅 0.4 m、堤防高 6.2 cm、天端長さ 4 cm、のり面勾配を 2 割勾配とした。また堀模型と堤防模型の断面積は、同程度となる条件で検討を行った。これは実際の工事において運搬費が発生しないため導入が容易となるからである。

#### (1) 水理模型実験ケースについて

樹林帯、堀、堤防を用いた多重防御構造の津波減勢に対する有効性を検討するため、堤防模型及び堀模型の

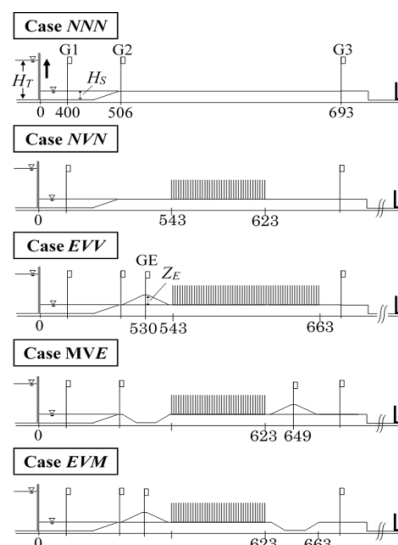


図-1 実験概要（数値はゲートからの距離(cm)）

キーワード 多重防御, 樹林帯, 堀, 堤防, 津波減災効果

連絡先〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学 TEL048-858-3564 E-mail: tanaka01@mail.saitama-u.ac.jp

有無等を変化させて、実験を行った。各実験ケースの命名規則として、*N*: Non (模型なし), *V*: Vegetation (樹林帯), *E*: Embankment (堤防), *M*: Moat (堀) とし、ゲートから流下方向にかけて配置されている模型順にケース名を定義した(図-1 にケース名を明記してある)。

入力波条件は、ゲート下流側静水深  $H_s$ : 5.5 cm, タンク水深  $H_t$ : 15, 20, 25cm の3ケースである。なお、すべての実験を最低3回行い、計測値の平均値を算出した。

ここで、タンク水深  $H_t$ : 15, 20, 25 cm について、Case *NNN* において測定点 G2 で観測された最大水位  $H_{G2-max}$  の平均値から固定床高さ 5.5 cm を差し引き、堤防高  $Z_E (=6.2 \text{ cm})$  で除した値を波高堤防高比  $H'$  と定義した。

(式(1))

$$H' = \frac{H_{G2-Max} - 5.5}{Z_E} \quad (1)$$

タンク水深  $H_t$  が 15, 20, 25cm のとき波高堤防高比  $H'$  はそれぞれ 0.81, 1.23, 1.58 となった。実験ケースによっては堤防が無い場合があるが、同じタンク水深については、同じ波高堤防高比を使用し、比較を行った。

## (2) 計測内容

津波減勢効果を検討するため、津波反射・遅延効果の影響、実験模型通過後の流量、流体力指標  $u^2h$  ( $u$ : 断面平均流速,  $h$ : 浸水深), 流体力により働く転倒モーメントの指標 (以後、モーメント指標)  $u^2h^2$  を比較した。堤内地側への流量、流体力指標、モーメント指標は、各ケース3回の実験をもとに、平均値を算出した。

### a) 反射波・津波遅延効果

各実験ケースにおける反射波は、ゲートから 400 cm 下流側の G1 地点に容量式波高計 (東京計測株式会社 HAT-106 (本体部), HAT-30 (検出部)) を設置し、G1 に津波到達後の水位時系列データにより把握した。また、津波遅延効果を評価するため、ゲートから 693 cm の G3 地点における水位時系列データを測定した。

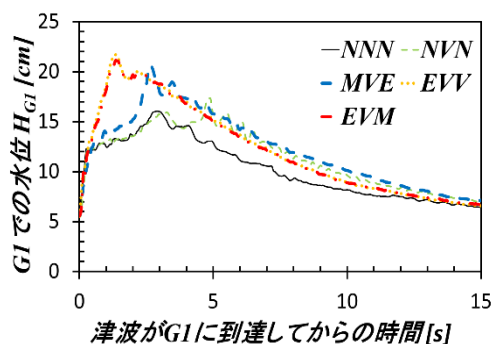


図-2 測定点 G1 での水位の時間変化

### b) 堤内地側への流入量

各実験ケースにおける堤内地側へ流入した流量を測定するため、第一波で堤防を越流または樹林帯を越えた流体を堤内地側 (陸側) で貯留した。貯留部の水位はポイントゲージで計測し、あらかじめ作成した水位-貯留体積曲線より、貯留部に流入した体積量 (以下、越流量) を算出した。第一波が各実験ケースの最後尾の模型を通過した後に、水路端からの反射波が再び模型を通過しないよう、第一波が通過後に汀線上で流れを遮断した。実験模型設置に伴う堤内地側への流入量の減少率  $\angle Q$  [%] は、以下の式(2)から算出される。

$$\angle Q [\%] = \frac{Q_{NNN} - Q}{Q_{NNN}} \times 100 \quad (2)$$

ここに、実験模型を設置しない Case *NNN* の流入量を  $Q_{NNN}$ , 実験模型を設置した場合 (Case *NNV*, *ENV*, *EMV*, *MEV*) の流入量を  $Q$  と定義している。Case *NNN* と各実験ケースの差をとっているため、 $\angle Q$  [%] の大きい方が流入量減少効果は大きいことを示している。

### c) 流体力・モーメント指標

家屋破壊の評価には流体力指標とモーメント指標の2つを考慮する必要性が指摘されている<sup>3)</sup>。そこで、各実験ケースにおいて内陸部の家屋破壊への影響を検討するため、ゲートから 693 cm の G3 地点における水位 ( $h$ ) を測定した。また、測定装置の都合上、流速と水位を同時に計測することが難しかったため、G3 地点から 3 cm 上流側の地点 (事前検討により優位な差がない地点) に設置されたレーザードップラー流速計 (KANOMAX SmartLDVII) により流速 ( $u$ ) を測定した。これらにより、流体力指標 ( $u^2h$ ), モーメント指標 ( $u^2h^2$ ) の最大値を算出した。

実験模型設置に伴う堤内地側への流体力指標、モーメント指標の減少率 (それぞれ、*RFI* (Reduction rate of Fluid force Index), *RMI* (Reduction rate of Moment Index) とする) を以下の式(3), (4)から算出し、比較した。

$$RFI [\%] = \frac{(u^2h)_{NNN} - u^2h}{(u^2h)_{NNN}} \times 100 \quad (3)$$

$$RMI [\%] = \frac{(u^2h^2)_{NNN} - u^2h^2}{(u^2h^2)_{NNN}} \times 100 \quad (4)$$

ここに、実験模型を何も設置しない Case *NNN* の流体力指標を  $(u^2h)_{NNN}$ , モーメント指標を  $(u^2h^2)_{NNN}$  とし、実験模

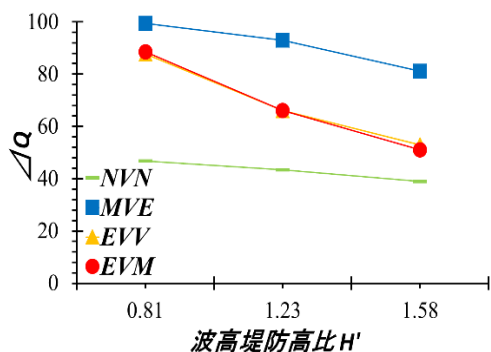


図-3 Case NNN に対する各ケースの越流量減少率

型を設置した場合(Case NNV, ENV, EMV, MEV)の流体力指標, モーメント指標をそれぞれ  $u^2h$ ,  $u^2h^2$  とした. Case NNN と各実験ケースの差をとっているため, RFI, RMI [%]が大きい方が流体力指標, モーメント指標の減少効果は大きい.

### 3. 結果と考察

図-2 に  $H'=1.58$  のときの G1 での水位の時系列を示す. Case EVV と EVM は海側の堤防反射により水位が急激に高くなっており, あまり差が見られない. Case MVE は堤防より海側に堀と樹林帯が存在するため, それらの反射により 1~3 秒間で 2 段階の水位上昇(前半は MV の反射, 後半は E もあわせた反射)が確認された.

図-3 に Case NNN に対する各ケースの流量減少率を示す. 抽水状態の樹林帯における樹木抵抗は, それぞれの津波規模に対する割合ではたらしき, それに伴って反射量も変わる. そのため, Case NVN では, 波高堤防高比が大きくなると  $\Delta Q$  は減少傾向にあるものの, その差は小さい. また, 堤防がゲートに最も近い位置にある Case EVV と EVM は, 図-2 において反射波に大きな差がないことから, 越流量に関してもほとんど差がなかった. 一方で堤防が汀線から最も遠い所にある Case MVE では, 堤防より海側での堀と樹林帯による反射と堤防による複合的かつ時間をかけた反射によって, 沖方向への透過量が減少し, 津波の規模が Case EVV, EVM と比較すると小さく, 越流量が大きく減少した.

G3 地点での水位時系列を図-4 に示す. Case NNN は G1 に津波が来てから 1.90s 後に G3 に到達した. これに対し, Case NVN, MVE, EVV, EVM の到達時刻はそれぞれ 2.80s, 3.15s, 3.45s, 3.30s となり, 最も遅延効果があるのは Case EVV であった. すなわち, 堀と堤防を組み合わせることで堤防より海側で跳水を発生させた場合の遅延効果よりも, 実験範囲では, 堤防越流後の樹木抵抗によって

流速を低減させる遅延効果の方が大きい値を示した.

G3 地点の水位は大きい順に, Case NNN, NVN, EVM, EVV, MVE となった. Case EVV では, 堤防を越流した流れは射流で流下方向に流れ, 背後の樹林帯前面で堰上げられた後, 樹林帯最背後にかけて一定勾配で水面が下がる. その間, 樹木抵抗を受けながら G3 に流れる. G3 到達時のフルード数は 1 未満であることから Case EVV では, 樹林前では射流であったものが, 樹木抵抗によって流速が低減し, 射流から常流に変化する際に弱跳水が発生し, G3 での水位が大きくなったといえる. また, Case EVM では樹林帯と堀の間の距離が影響していると考えられる. 樹林帯模型と堀模型の間の距離が少し離れているため, 水面勾配がついた状態の水流が堀内の海側法面と底面を滑るように流れ, 陸側の堀法面に沿って斜方投射されるように勢いよく流れ出ていく. そのため, 後方の水位測定点では大きくなった. 一方, Case MVE は堤防越流後, 流下方向に射流で流れるため, 流速は大きい水深は小さくなった.

図-5(a), (b)に Case NNN に対する各ケースの流体力指標減少率とモーメント指標率を示す.  $H'=0.81$  の場合, 水深が LDV の測定に必要な水深に達しなかったため, 同図にプロットしていない. 流体力指標は水深よりも流速が大きく影響する. Case MVE は最も陸側に堤防があり, 越流すると射流で流れるため流速が大きく, 流体力指標も大きくなった. 一方, Case EVV, EVM は堤防を越流するが, 樹林帯による抵抗によって流速が比較的小さくなるため, 結果として流体力指標も小さくなった. Case EVV と EVM の間にも違いが見られた. 本実験では Case EVM において, 堀が水位を上昇させてしまっている可能性が大きい. 水位が低く, 樹林帯抵抗を増やした Case EVV の方が EVM よりも小さな流体力指標を示した. つまり, 堀を設置するよりも樹林帯列数を延

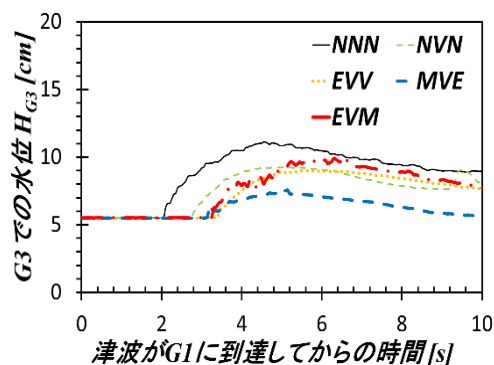


図-4 測定点 G3 での水位の時間変化



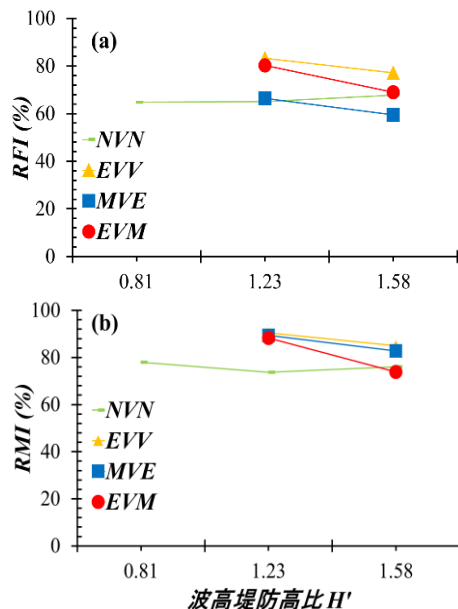


図-5 Case NNN に対する各ケースの(a)流体力指標減少率, (b)モーメント指標減少率

ばし, 樹木抵抗を増やす方が流体力指標を抑えるには効果的であった。ただし, 実現象では, 樹林帯は沈水状態になる場合もあるため, 樹木抵抗が減り, 流体力指標が大きくなることが予想される。一般的に論ずるには, 樹林帯が沈水状態になるケースも実施する必要がある。

モーメント指標は流速と水深が同程度で影響するため, Case MVE と Case EVM で逆転している。Case MVE は堤防前面に堀と樹林帯があるため, それらの反射により堤防を越流する量のある程度減少させている。つまり, Case EVV や EVM と比べると比較的規模が小さい津波が越流したと考えられる。そうなれば, 越流後の流速も増加はするものの, ある程度の増大は抑えられる。水位に関しても比較的小さく抑えられるため, Case EVM よりも RMI が高くなったと考えられる。

以上より, 海岸部において海岸樹林帯の前後のスペースを活用した場合における, 津波減災に資する多重防御構造については, 越流量を減少させ浸水範囲を減らすのに適した Case MVE, 到達遅延効果を大きくし, かつ流体力を減少させるのに適した Case EVV があることが明らかとなった。目的に応じた使い分けの必要性が示唆された。

#### 4. 結論

本実験によって得られた結論を以下に記す。

- (1) 堤防前面での反射を増やす Case MVE, つまり汀線

から陸側に堀, 樹林帯, 堤防という順番の多重防御構造にした場合が最も越流量を減少させる。

- (2) 樹木抵抗による流速低減効果が最も良く, 汀線から陸側に堤防, 樹林帯, 樹林帯という多重防御構造 (Case EVV) が最も遅延効果を発揮する。
- (3) 流速を低減させる, かつ, 水位も比較的小さく抑えることができる Case EVV が最も流体力指標・モーメント指標を減少させる。

本実験において樹林帯は常に抽水状態であり, 樹木抵抗が大きめに評価されていると考えられるため, 今後は樹林帯が沈水状態での実験も必要である。

#### 謝辞

本研究の一部に, 科学研究費補助金基盤研究 B (No. 15H02987, 代表: 田中規夫) を使用した。埼玉大学大学院博士課程 1 年の五十嵐善哉氏に実験に関して助言をいただいた。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 庭田侑, 田中規夫: 北海道白糠町和天別における減勢工型の堀と盛土を併せ持つ海岸防災林の津波減勢効果, 土木学会関東支部発表会 II-43(CD-ROM), 2015.
- 2) 北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場, 森林総合研究所東北支所, 埼玉大学: 平成 25~27 年度重点研究報告書「海岸防災林の津波減衰機能を発揮させる樹林帯整備・管理の方法の開発」, 69p, 2016.
- 3) Tanaka N., Yasuda S., Iimura K., Yagisawa J., Combined effects of coastal forest and sea embankment on reducing the washout region of houses in the Great East Japan tsunami, J of Hydro-env. Res., 8, 270-280, 2014.
- 4) 座波健仁, 五十嵐善哉, 田中規夫: 堤防越流直後の流れに対して杭群が与える変化とエネルギー減少メカニズム, 第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会 II-5
- 5) Tanaka, N. & Igarashi, Y., 2016. Multiple defense for tsunami inundation by two embankment system and prevention of oscillation by trees on embankment. Proc. of 20th IAHR-APD, Colombo, Sri Lanka (accepted).
- 6) 二瓶泰雄, 柳沢舞美, 釜石達也, 南まさし: 津波越流量抑制のための多重防潮堤の設置条件の実験的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. 70, No.2, pp.I\_331-I\_315, 2014.
- 7) 新美達也, 川崎浩司, 馬渕幸雄, 長山恒紀, 辻貴仁, 大家隆行, 松田和人: 貞山運河による津波減災効果に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. 69, No.2, pp.I\_211-I\_215, 2013.
- 8) 五十嵐善哉, 田中規夫: 樹林帯と海岸堤防の組合せ配置による津波の海岸堤防越流量の変化, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72, No.4, pp. I\_397-I\_402, 2016.
- 9) 田中規夫, 小内堯, 近藤康太: 津波流体力とそのモーメントによる破壊規模ごとの家屋被害関数, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol.71, No.1, 1-11, 2015.