海岸林と防潮堤の位置関係が周辺流況と減勢効果に及ぼす影響に関する実験的研究

飯村 耕介¹・池田 裕一²・内海 翔太³・青木 貴志⁴

¹ 正会員 宇都宮大学助教 大学院工学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)
E-mail: k_iimura@cc.utsunomiya-u.ac.jp

² 正会員 宇都宮大学教授 大学院工学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)
E-mail: ikeda@cc.utsunomiya-u.ac.jp

³ 学生会員 宇都宮大学大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻
(〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

⁴ 東日本旅客鉄道株式会社 (〒151-0053 東京都渋谷区代々木 2-2-2)

津波の減災対策を考えるうえで、複数の構造物を適切に配置することが非常に重要となる。本研究では防潮堤と海岸林を組み合わせて配置したときの配置方法や配置間隔による構造物周辺の流況や減勢効果に与える影響について水理模型実験により検討した。防潮堤よりも海岸林を下流側に配置したときに、模型背後の流速が緩和され、さらに防潮堤と海岸林を離して配置することで海岸林への作用力が大きくなり、模型背後におけるエネルギーをさらに低減させることができる。一方で、防潮堤よりも海岸林を上流側に配置したときには、防潮堤背後に抵抗となる構造物が何もないため、防潮堤を越流するときに流れが加速し非常に速い流れとなる。また、海岸林への作用力は、海岸林背後の防潮堤による堰き止め効果により海岸林内の流速が遅くなり、作用力も小さくなる。

Key Words : *coastal forest, coastal embankment, combined effect, tsunami mitigation, tsunami flow pattern*

1. はじめに

海岸林が持つ津波減災効果については首藤の研究¹⁾をはじめ古くから知られているが、特に1998年のパプアニューギニア地震津波や2004年のインド洋大津波に際してその効果が再認識され、有力な津波対策の一つとして注目されており、現在まで数多くの研究^{2), 3), 4), 5)}が行われている。

一方、2011年の東北地方太平洋沖地震に伴って発生した巨大な津波によって東北・関東地方の太平洋沿岸地域は未曾有の被害を受けた。巨大な津波を防潮堤等で完全に防ぎきることは困難であり、津波を段階的に減じていく減災対策が必要となる。今後の海岸整備については、数10年から百数10年に1回の頻度で発生するレベル (L1, 近代で最大) の津波に対する対策と、L1をはるかに上回るレベル (L2, 最大級) の津波に対する対策に分け、特にL2に対しては堤防のみによる『防災』ではなく、都市計画・土地利用計画による多様な手法により『減災』を実現していく方針となっている⁶⁾。その中で、海岸林や砂丘なども津波の流体力の低減や、到達時間の遅延をさせる減災施設と位置づけ、その機能を定量的に評価して

いくことが重要な課題となっている。田中ら⁷⁾や佐々木・田中⁸⁾は2011年4-5月に仙台平野の海岸林や家屋、堤防の被災状況を18地域で調査し、同地域の津波痕跡浸水深を計測した。この現地調査において、海岸堤防より海側に海岸林がある場合は樹木の幹が破断し流失した例が多いものの、逆の場合 (海岸堤防より陸側に海岸林がある場合) は堤防背後の洗掘域より陸側の樹木は倒伏していたものの現場に留まっている事例が多く見受けられた。また、海岸林の岸沖方向幅が長い場合は、海岸から離れている場所では海岸林に被害が見られないものもあった。その一方、砂浜・砂草・海岸林の連続性を考慮し、海岸林よりも陸側に堤防を引堤することを薦める意見や、経済的な面で防潮堤を整備することが困難な開発途上の国においては海岸林背後の道路を盛土により嵩上げすることで減災効果を得ることができるとされている⁹⁾。また、土屋ら¹⁰⁾は消波工と防潮林を組み合わせて配置したときに、消波工と防潮堤の距離によって防潮堤前面・背後での水平波力が変化することを示している。

このように、海岸林と防潮堤などの防災構造物の併設はL2津波の減災対策として非常に重要であり、本研究では、海岸林と防潮堤を組み合わせたときの構造物周辺の

流況に着目し、構造物の位置関係を変化させた水理模型実験から流れの構造を把握し、津波減勢効果を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

(1) 実験水路および実験模型

海岸林と防潮堤の位置関係の違いが流況や減勢効果に与える影響を明らかにするために水理模型実験を行った。実験水路は、側面から流れの様子が観察しやすいように透明の塩化ビニル板を用いて、全長 10 m、幅 0.3 m、深さ 0.3 m の水路を作製し、水路床勾配を約 1/500 となるように調整した。この水路に海岸林模型と防潮堤模型を配置して実験を行った。

海岸林模型は、現地の 1/100 スケール程度の縮尺で作製した。対象とする海岸林の現地スケールの条件は、田中ら⁷⁾のクロマツに関する調査結果を参考に、胸高直径 15 cm、海岸林密度 0.2 本/m²とした。これらの現地スケールの値に対して、海岸林模型の縮尺が 1/100 程度となるとときに、首藤¹⁾の海岸林の規模を表すパラメータである式(1)に示す植生厚み dn が同程度となるように模型における海岸林密度を決定した。

$$dn = d\gamma W_v \tag{1}$$

ここに、 d は胸高直径（単位はcm）、 γ は海岸林密度（単位面積当たりの樹木本数で、単位は本/m²）、 W_v は岸沖方向の海岸林幅（単位はm）である。今回対象とした現地スケールにおける植生の厚み dn は、岸沖方向の海岸林幅を 100 m としたときに 300 本・cm となる。この値を参考に作製した海岸林模型では、海岸林はアクリル製の円柱棒でモデル化し、直径 0.2 cm、海岸林密度 1379 本/m²で千鳥状に配置した。このときの模型における植生の厚み dn が 276 本・cm となり、現地スケールとの差が 1 割以内に収まっている。

防潮堤模型も海岸林模型と同様に、現地の 1/100 スケール程度の縮尺で作製した。田中ら⁷⁾の現地調査では、仙台市若林区の防潮堤の天端高さは T.P. 5.4 m となっている。そこで防潮堤高さがおおよそ 1/100 スケールとなる 5 cm を最大として、4 cm、3 cm を合わせた 3 種類の高さの異なる防潮堤模型を作製した。なお防潮堤模型の底面幅は 10 cm、天端幅は 3 cm としている。

(2) 実験方法および実験条件

本実験では、複数の津波対策構造物を配置したときの構造物周辺の基本的な流況に着目するため、遡上津波のピーク付近を想定した、表-1に示すような定常流下で実験を行った。遡上津波のフルード数については既往の研究^{11), 12)}から0.6~2.0程度と評価されており、本研究では、

表-1 流れの条件

水路床勾配	1/488
流量	4150 cm ³ /s
フルード数（等流状態）	0.7
代表水深（等流状態）	3.4 cm
代表流速（等流状態）	40 cm/s

図-1 実験模型の配置方法

表-2 実験ケース一覧

Case no.	配置方法	H (cm)	G (cm)	W _v (cm)
Case-A301	type A	3	0	200
Case-A302		3	50	
Case-A401		4	0	
Case-A402		4	50	
Case-A501		5	0	
Case-A502		5	50	
Case-A503		5	100	
Case-B301	type B	3	0	
Case-B302		3	50	
Case-B401		4	0	
Case-B402		4	50	
Case-B501		5	0	
Case-B502		5	50	
Case-B503		5	100	
Case-C301	type C	3	0	
Case-C302		3	50	
Case-C401		4	0	
Case-C402		4	50	
Case-C501		5	0	
Case-C502		5	50	
Case-C503		5	100	

この範囲に収まるように、模型を配置しない等流状態で0.7となるように設定した。

また、海岸林模型と防潮堤模型の配置方法と実験ケースを図-1、表-2にそれぞれ示す。海岸林模型と防潮堤模型の配置方法はtypeをA, B, Cの3つに分け、それぞれ、type Aは防潮堤模型を海岸林模型の上流側に配置、type Bは防潮堤模型を海岸林模型の下流側に配置、type Cは防潮堤模型を海岸林模型の間に配置としている。それぞれの配置typeに対して、防潮堤高さ H と防潮堤・海岸林間距離 G を変化させながら実験を行った。

測定項目については、水位はポイントゲージを用いて水路横断方向の中心点で、流下方向に10cm間隔、構造物周辺に関しては1cm間隔で測定した。流速は二成分型電磁流速計（L型プローブ）を用いて、鉛直方向と流下方向の流速を流下方向に50cm間隔で鉛直方向には水深60%の点で1点のみ、構造物周辺に関しては流下方向2cm、鉛直方向1cm間隔で測定した。

3. 実験結果および考察

(1) 水位の測定結果と考察

海岸林模型および防潮堤模型の配置方法や配置間隔が流れに与える基本的な影響を明らかにするために、まず各ケースの水深計測を行った。図-2(a)~(c)には、防潮

堤・海岸林間距離 G が0 cmとなるときの各配置typeにおける水面形の縦断変化をそれぞれ示す。配置typeの違いによって水面形が大きく異なっており、type Aでは、防潮堤の上流側では水が堰き止められるため水位が大きく、防潮堤越流時には速い流れとなり水位が急激に小さくなるが、越流直後に海岸林があるため、今度は海岸林堰き止めにより海岸林内で緩やかに水位が上昇したのち、減少に転じる。type Bでは、防潮堤の上流側に海岸林が配置されているため、両構造物の堰き止め効果が重なり、模型上流側（250 cm 地点）における水位はtype A よりも約0.7 cm 大きくなっている。海岸林内での水面形は背後の防潮堤による堰き止めにより、type A よりも緩やかに変化している一方で、防潮堤越流時には背後に抵抗となる構造物が無いので、大きく水位が減少し、非常に早い流れのまま流下していく。ここに、海岸林前後における水位差はtype A では約2.2 cm、type B では約1.3 cm となり、防潮堤前後における水位差はtype A では約3.1 cm、type B では約5.8 cm となった。type C では、防潮堤を中心に、防潮堤の上流側ではtype B と同様の傾向、防潮堤の下流側ではtype A と同様の傾向がみられるような水面形の変化が見られた。

図-3(a)~(c)には防潮堤・海岸林間距離 G を50 cm としたときの各配置typeにおける水面形の縦断変化をそれぞれ示す。 $G=0$ cm のときと比較して、水面形の変化の

図-2 $G=0$ cm の各配置type における水面形

図-3 $G = 50$ cm の各配置 type における水面形

仕方に大きな違いは見られないが, type A について, $G = 0$ cm のときは防潮堤越流後の海岸林内で水位の上昇がみられたが, $G = 50$ cm とし, 模型間の距離を広げたことでその模型間で海岸林の堰き止め効果による水位の上昇がみられるようになり, 海岸林内では水位は一樣に減少する傾向にある. このときの海岸林前後における水位差は約 3.5 cm となり, $G = 0$ cm のときと比べて 1 cm 程度増加しており, 海岸林による流れのエネルギー損失が増加していると考えられる.

なお, 防潮堤模型の高さ H を変化させたケースでは, 防潮堤が低くなるため $H = 5$ cm の結果と比較すると防潮堤による堰き止め効果が小さくなり, 防潮堤の上流側で全体的に水位は小さくなるものの, 配置 type や防潮堤・海岸林間距離 G による水面形の変化の傾向に変化は見られなかった.

(2) 流速の測定結果と考察

配置方法の違いが周辺流況に与える影響を明らかにするために, 電磁流速計による流速の測定を行った. なお, type C に関しては防潮堤・海岸林間距離 $G = 0, 50$ cm のどちらの場合も防潮堤を中心に, 防潮堤よりも上流側は type B と同様の傾向, 防潮堤よりも下流側は type A と同様の傾向を示したため, ここからは type A と type B に着目して検討を行った.

図-4 (a)~(b)には, 防潮堤・海岸林間距離 G が 50 cm となるときの各地点における水平方向流速の鉛直分布を示す. 構造物周辺の流況を把握するために, 各配置 type において, 防潮堤・海岸林間を中心にプロットしているため, type A では流下方向距離 280~380 cm, type B では流下方向距離 480~580 cm における結果を示す. また図中の各流速分布の横軸の目盛りは 1 目盛りあたり 30 cm/s を表している.

type A について, 模型上流側 (290 cm 地点) では鉛直方向にあまり大きな変化のない流速分布で流れるが, 防潮堤模型の直前 (300 cm 地点) では防潮堤を乗り越えるために防潮堤の天端付近に大きなピークを持つような分布に変化している. 防潮堤越流後の両模型の間では, 越流直後 (310 cm 地点) は越流に伴う流れの加速によって水面付近に流速のピークがあったものが, 10 cm ほど流下するとピークの位置が少し底面よりとなり, 底面から高さ 2~3 cm 付近に大きなピークを持つような分布を持っている. またこのような分布は海岸林模型の前面 (360 cm 地点) まで, 多少滑らかな分布になりつつも維持されて流れていくことが分かる. 一方, type B においては海岸林直後 (500 cm 地点) から両模型の間では鉛直方向にほぼ一樣な鉛直分布を持つ流れで, type A と同様に防潮堤模型の直前 (550 cm 地点) で防潮堤を乗り越えるために防潮堤の天端付近に大きなピークを持つような分布に

図-4 $G = 50$ cm の type A, B における流下方向流速の鉛直分布

変化する。また、type A, Bともに水深が浅くなる防潮堤天端から越流直後では鉛直方向の分布点が十分にとれず、測定精度も十分ではないと考えられ、今後は別の測定法によるさらなる検討が必要である。

(3) 減勢効果に関する考察

流速の減勢効果については、全模型背後における水深平均流速をみると、 $G = 0, 50$ cmの場合のそれぞれについてtype Aでは38 cm/s (510cm地点)、39 cm/s (560cm地点) となり、type Bでは49 cm/s (510cm地点)、53 cm/s (560cm地点) となった。type Aでは防潮堤の背後に海岸林があるため、海岸林が抵抗となり流速が低減されるが、type Bでは防潮堤背後に抵抗となる構造物が何もないため、防潮堤を越流するとき流れが加速し、type Aよりも流速が2～3割程度大きくなる結果となった。

図-5には防潮堤・海岸林間距離 G を変化させたときの模型背後におけるエネルギーを水頭として算出したものを示す。type Bでは模型間距離 G を変化させても背後のエネルギーに大きな変化は見られないが、type Aの場合は模型間距離 G が大きくなるにつれて模型背後のエネルギーが減少する傾向にあり、わずかに減勢効果が上がることが確認できた。この要因として、流れが射流から常流に遷移する際にエネルギーが低減されたこと、また水位の測定結果から海岸林前後の水位差が模型間距離 $G = 0$ cmのときよりも $G = 50$ cmの方が大きくなっていることから、海岸林によるエネルギー損失が増加したことが考えられる。図-6には防潮堤・海岸林間距離 G を変化させたときの海岸林模型によるエネルギー損失を水頭として算出したものを示す。type Bでは模型間距離 G を変化させても海岸林によるエネルギー損失に大きな変化は見られず、また損失量もtype Aに比べて小さい。一方、type Aの

図-5 type A, B における模型背後のエネルギー

図-6 type A, B における海岸林模型による損失エネルギー

図-7 type A, B における海岸林前前面の流体力指標

場合はtype Bに比べて海岸林によるエネルギー損失が大きく、また模型間距離 G を大きくすると損失も大きくなる。これは防潮堤と海岸林が離れることで防潮堤によって加速した流れが海岸林にぶつかり、海岸林への作用力が増加したためだと考えられる。そこで海岸林への作用力を評価するため流体力指標の算出を行った。海岸林1本あたりへの作用力は以下の抗力 F (式(2)) で算出される。ここに、 ρ は水の密度、 C_D は抗力係数、 U は流速、 h は水深である。流体力指標は $U^2 h$ の部分であり、流速には水深平均流速が用いられることが多いが、type Aの場合、流速が海岸林模型前面で鉛直方向に大きく変化するため、流体力指標 f は式(3)のように、本実験で得られた流速 u を用いて鉛直方向に積分することで算出した。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D U^2 h \quad (2)$$

$$f = \int_0^h u^2 dh \quad (3)$$

図-7に海岸林模型前面における流体力指標の結果を示す。type Aにおいて、模型間距離 G を大きくすることで海岸林への作用力が大きくなっていることが確認できた。

4. おわりに

以上、本研究では防潮堤と海岸林を組み合わせて配置したときの配置方法や配置間隔による構造物周辺の流況に与える影響や、減勢効果に与える影響について水理模型実験により検討した。防潮堤よりも海岸林を下流側に配置したときに、模型背後の流速が緩和され、さらに防潮堤と海岸林を離して配置することで海岸林への作用力が大きくなり、模型背後におけるエネルギーをさらに低減させることができることが分かった。ただし模型間の流速が速く、作用力が大きいうことは樹木の流失・破壊の危険も高く、今後さらなる検討が必要となる。

謝辞：本研究は、(財)河川財団の河川整備基金の助成を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 首藤伸夫：防潮林の津波に対する効果と限界，第32回海岸工学講演会論文集，pp.465-469，1985。
- 2) 平石哲也，岩瀬浩之：1998年パプアニューギニア津波を対象としたグリーンベルト防災の効果，海岸工学論文集，第50巻，pp.1366-1370，2003
- 3) Danielsén, F., Sorensen, M. K., Olwig, M. F., Selvam, V., Parish, F., Burgess, N. D., Hiraishi, T., Karunagaran, V. M., Rasmussen, M. S., Hansen, L. B., Quarto, A. and Suryadiputra, N.: The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation, *Science*, Vol.310, No.5748, p.643, 2005.
- 4) Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M. I. M. and Jinadasa, K. B. S. N.: Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: Experience of the recent Indian Ocean tsunami, *Landscape and Ecological Engineering*, Vol.3, pp.33-45, 2007.
- 5) Mascarenhas, A. and Jayakumar, S.: An environmental perspective of the post-tsunami scenario along the coast of Tamil Nadu, India: Role of sand dunes and forests, *Journal of Environmental Management*, Vol.89, pp.24-34, 2008.
- 6) (独)港湾空港技術研究所：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料 No.1231，173p，2011。
- 7) 田中規夫，安田智史，八木澤順治：津波時における海岸林の家屋被害軽減量の定量化，京都大学防災研究所東日本大震災特別緊急共同研究報告会，京都大学，pp.29-38，2012。
- 8) 佐々木寧，田中規夫：東北地方太平洋沖地震における津波被害と海岸林の状況～仙台平野(福島県・宮城県)における海岸林被害状況調査結果～，埼玉大学 HP (<http://iest.saitama-u.ac.jp/project/file/report-tsunami-Sendai%20Heiya20110609.pdf>)，2011。
- 9) 佐々木寧，田中規夫，坂本知己：津波と海岸林 バイオシールドの減災効果，pp.181-203，共立出版，2013。
- 10) 土屋十圓，吉江悟：津波に対する防潮林の保全と消波工の連携型水理実験，第67回土木学会年次学術講演会講演概要集，II-214，pp.427-428，2012。
- 11) Kawata, Y., Benson, B., Borrero, J., Davies, H., de Lange, W., Imamura, F., Letz, H., Nott, J. and Synolakis, C. E.: Tsunami in Papua New Guinea was as intense as first thought, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol.80, pp.101-105, 1999.
- 12) Tanaka, N., Yagisawa, J. and Yasuda, S.: Breaking pattern and critical breaking condition of Japanese pine trees on coastal sand dunes in huge tsunami caused by Great East Japan Earthquake, *Natural Hazards*, Vol.65, pp.423-442, 2013.

EXPERIMENTAL STUDY FOR EFFECT OF A COMBINED POSITION OF COASTAL FOREST AND EMBANKMENT ON TSUNAMI FLOW PATTERN AND TSUNAMI MITIGATION

Kosuke IIMURA, Hirokazu IKEDA, Shota UTSUMI and Takashi AOKI

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 and tsunami mitigation by the hydraulic model experiment. The flow velocity behind model is mitigated, when the coastal forest is in the lower stream side of the coastal embankment. Moreover, the flow energy behind model is mitigated, when the distance of the coastal embankment and the coastal forest leaves, since the resistance force of the coastal forest becomes large.