

津波に対する防潮林と消波工の一体型水理実験 —東日本大震災巨大津波による防潮林調査—

土屋 十園*

Hydraulic test on a combined body with tidal forest and wave dissipating works in order to reduce tsunami force

Mitsukuni TSUCHIYA *

Abstract

In March 11, 2011, mega earthquake of the east Japan occurred and caused great damages mainly by tsunami. We carried out damage survey of coastal, river structure, and tidal forests that based on documents and fields works in Iwate and Miyagi prefecture at April, August, 2011. Survey results demonstrated that long-term reconstruction of tsunami mitigation works would become necessary. In especially, wide spaces and long times need due to restore the tidal forests function.

Therefore, we suggest an effectual measures, which tidal forests and coastal structure was jointed for tsunami measures in the future. In this study, we had hydraulic model test that based on a combined wave dissipating works and tidal forests in consideration of seashore in Miyagi prefecture. We clear that hydraulic tests revealed importance of flow patterns inside and outside of forest parts and existence of effective length between the offshore wave dissipating blocks and forests.

キーワード：防潮林，消波工，津波，水平波力，水理実験

Key words：tidal forests, wave dissipating works, tsunami power, horizontal wave force, hydraulic test

1. はじめに

2011年3月11日午後14時46分，東北地方太平洋沖に発生した海溝型の巨大地震（M9.0）は，1000

年に一度という確率で起っている事が分かってきた¹⁾。以降，3.11巨大地震あるいは3.11津波と呼ぶ。これに伴う巨大津波が発生し，岩手，宮城，

* 現・中央大学理工学研究所 前橋工科大学名誉教授
Institute of Science and Engineering, Chuo University
Professor Emeritus, Maebashi Institute of Technology

本論文に対する討論は平成26年5月末日まで受け付ける。

福島、茨城および千葉を中心として太平洋岸で死者・行方不明者あわせて計2万人近い人命を奪った。この地震は津波地震²⁾と呼ばれ港湾・海岸・河川・道路・鉄道・下水施設・漁港などの社会基盤や公共施設および工場・エネルギー関連施設、住宅・田畑などの生産および生活基盤に甚大な被害を与えた。内閣府の発表では総被害額16.9兆円である³⁾。また、東京電力福島原発の地震・津波による直接的な破壊は格納容器の損壊にともなう放射能汚染を引き起こし、大気、水質、土壌、生物とその土地および公共水域である河川・海域への深刻な汚染をもたらした。これは緊急かつ長期的対策が求められている。社会基盤の復興事業も、同様に都市計画に基づく早い復興が今後の課題である。

著者らは土木学会水工学委員会の調査団として、同年4月20～21日、25～28日、8月22～24日にそれぞれ茨城県、岩手県、及び宮城県の海岸・河口・河川の現地調査を行い被害状況の実態を把握した。この調査では①河川堤防の被災（津波遡上、氾濫による）、②漂流物による河川構造物被害、③津波による家屋流失の水工学的検討（防潮林などの植生の減災効果含む）を主題とした調査を実施した。調査結果の速報⁴⁾は土木学会水工学委員会のホームページに掲載されている。

3.11巨大地震は従来の地震被害の規模や内容を遙かに越え、多重的・複合的かつ広域的に甚大な被害を与えた。本報告では、上記の③津波による防潮林の被害・減災効果に関して現地調査および水理実験による検討を行ったものである。

2. 防潮林の機能と目的

本報告で使う「防潮林」の名称は海岸管理を行っている地方自治体では海岸保全施設整備事業（岩手県）において堤防、水門などととも、「海岸防災林」と整備指定されて呼ばれている。また、指定されていない樹林は単に「海岸林」と呼ばれている。本報告ではこれらを一括して以降「防潮林」と呼ぶこととする。防潮林の役割は津波、高潮、侵食などから陸域（海岸線）を保全する機能を有し、国土の保全を図ることにある。また、環境と

しての機能や景観・リクリエーション機能としても保全の対象となっている。本報告では下記の既往研究の成果から防潮林を人工的な海岸保全施設と連結したものと位置づけ、防潮林の損壊を軽減することを目的に防潮林の沖側の海浜に消波工を設置し、津波（段波）による樹林帯内・外の流体の挙動を水理実験によって検討することとした。

3. 既往研究

津波に対する防潮林の効果と限界に関する研究はすでに多くなされ、首藤（1985, 1992）^{5,6)}、原田ら（2004）の研究⁷⁾及び飯村・田中ら（2010）の研究⁸⁾等によって津波に対する物理的メカニズムが明らかにされている。即ち、首藤（1985）は次のように整理している。1)直径が10cm以下の防潮林では浸水深が4m以上になると倒伏・折損する。2)直径30～40cmであっても浸水深が4m以上になると折損する。この研究は明治29年三陸大津波、昭和8年三陸大津波、昭和21年南海地震津波、昭和35年チリ地震津波、および昭和58年日本海中部地震津波から得られた43地点のデータを元に破壊の状況を明らかにしている。また、首藤（1992）は津波高さ被害程度を総合的にまとめている。この研究では防潮林被害と防潮林効果を検討し、津波高が4mを越えると樹林に部分的な被害が発生し、津波高が8mを越えると樹林は全面的に被害が発生して防災効果が無くなることを示した。この研究の成果は3.11巨大津波でも実証されていると考えられる。しかし、津波の防潮林への入射角度によっては被害が軽減されている箇所が見受けられる（久慈市久慈川河口防潮林ほか）。また、原田ら（2004）では津波被害の低減のための防潮林の活用に関して水理実験による検討を行っている。この調査研究では、防潮林幅と津波の低減効果を検討している。即ち、200mの防潮林幅ならば、浸水被害に係る浸水深を5～6割、流体力による被害に係る流速は4～6割に低減させることができることを明らかにしている。飯村・田中ら（2010）は樹林密度の異なる植生帯を組み合わせたときの津波軽減効果に関する研究を水理実験で行い、植生密度が大きくなるほ

ど植生背後への影響を低減できることを報告している。

4. 防潮林調査

本報告では防潮林の管理がどのようになされているか、岩手県⁹⁾と宮城県¹⁰⁾の行政資料から市町村別に計画津波高、堤防の現況天端高、海岸防災林の規模(延長)、3.11浸水高/遡上高などの調査を行った。なお、浸水高は気象庁の平成23年度地震火山月報(防災編)を、遡上高は地震津波に対する専門調査グループ調べ¹¹⁾と、毎日新聞(2011.4.15, 同4.24)、東京新聞(2011.7.3)、及び郡司准教授(東大地震研究所)の毎日新聞(2011.3.25)を参照した。防潮林の存在する海岸名のうち測定値のない海岸は近傍の上記の公表されている浸水高、遡上高(推定値)とした。これらの資料をもとに作成した一覧を表1、2に示す。

4.1 岩手県

岩手県は海岸線延長が約700kmであり、そのうち海岸防災林は3.8km、海岸林2.5kmの合計6.3kmである。海岸線延長に対して約0.9%となっている。計画津波高に対する3.11津波は久慈

市漁港では計画・現況とも T.P+8.0m に対して浸水深8.6m、遡上高13.4mである。延長800mの防潮林はほぼ破断・倒壊し、線状に100m程度残存していたが、その背後地の人家は被害が比較的少ない(写真1、2)。野田村・野田海岸は計画津波高 T.P+12.0m、現況 T.P+7.8m に対して浸水深10m以上(推定)遡上高16.9~19.0m。ただし、侵食の計画・現況とも T.P+10.3m である。野田海岸1,300mの防潮林(黒松)は海岸堤防の損壊とともにほぼ全滅的な破断・倒伏である(写真3)。海岸防災林の指定はない高田松原海岸は津波計画高・現況とも T.P+5.5m に対して浸水深15.8m、遡上高21.5mであり、浸水深は地盤標高を考慮すると計画高に対して2.4倍以上の津波に襲われたことになる。防潮林1,700mのうち残存した1本松は復興のシンボルとなった。その他の防潮林は計画津波高ではなく侵食に対する計画・現況となっている。現況高は大槌町波板地区 T.P+4.5m、大船渡市本郷地区 T.P+2.2m に対してそれぞれ陸上の浸水深9.5~10.8m、遡上高31.9m(推定)である。浸水深は地盤高を含まないため地盤標高を考慮するとそれぞれ現況高の約2倍、6倍の津波が襲ったことになる。

表1 岩手県・海岸保全基本計画と防潮林(岩手県庁資料に加筆)

岩手県 市町村	海岸線700km 海岸名	護岸水準 津波		侵食		海岸保全施設整備			東日本大震災 浸水高/遡上高
		計画津波高 (TP+12.0m)	現況天端高	計画高	現況天端高	堤防/水門	海岸防災林施設	海岸林	
種市町	鹿糠地区				TP+7.3m		100m		5~9m
久慈市	麦生地区			TP+6.0m	TP+6.0m		500m		
久慈市	漁港海岸	TP+8.0m	TP+8.0m	TP+4.3m		護岸570m/津合50m		800m	8.6m/13.4m
野田村	野田海岸	(TP+12.0m)	TP+7.8m	TP+10.3m	TP+10.3m	堤防1,100m/水門	1,300m		10m以上(推定)/16.9~19.0m
野田村	土内地区			TP+5.9m	TP+5.9m		150m		
野田村	下村地区			TP+5.9m	TP+5.9m		100m		
野田村	浜山地区			TP+5.2m	TP+5.2m		150m		
大槌町	波板地区			TP+8.35m	TP+4.5m		500m		
大船渡市	本郷地区				TP+2.2m		350m		9.5~10.8/31.9m(推定)
大船渡市	赤崎地区				TP+2.50m		250m		9.5~11.8/31.9m(推定)
大船渡市	赤土倉地区				TP+5.63m		300m		9.5m/31.9m(推定)
陸前高田市	高田松原海岸	TP+5.5m	TP+5.5m				1,700m(推定なし)		15.8m/21.5m
陸前高田市	沼田地区				TP+2.60m		100m		15.8m/21.5m(推定)
計							5,500m	800m(0.9%)	

注釈: この調査では岩手県の海岸の整備箇所整理表(平面図付)から読み取りました。本研究の目的から防潮林ないし、防潮林と見なされる保安林などの海岸林を対象として農水省事業の「海岸防災林施設」もこれに含まれています。また、この指定区域に重複や隣接する堤防・水門等を「海岸保全施設整備」の欄に併記しています。堤防・護岸などのある箇所の計画高、現況高を津波と侵食に分けて記載しています。

表2 宮城県・海岸の概要と防潮林（宮城県庁資料に加筆）

宮城県	海岸線828km	津波・高潮		侵食		海岸保全施設整備			東日本大震災
市町村	海岸名	計画津波高	現況天端高	計画	現況天端高	堤防/水門	海岸防災林	海岸林	浸水高/遡上高
気仙沼市	稲村浜海岸	なし	なし	TP+4.5m	TP+4.5m	護岸・消波堤		環境・森林	3.7~4.1m/20.6m
気仙沼市	十八鳴浜海岸	なし	なし					環境・唐松	/20.6m
歌津町	泊漁港海岸	TP+4.62m	TP+4.62m			胸壁		環境・黒松	/15.9m
河北町	横須賀海岸	TP+4.5m		TP+4.5m		堤防・リーフ	環境・植生	保安林	/15.9m
女川町	塚浜漁港海岸	TP+2.9m				胸壁・陸間	鳴り砂		8.6m/15.6m
牡鹿町	三陸南沿岸	TP+4.5m				堤防・離岸堤	環境		
宮城県	海岸線828km	高潮		侵食		海岸保全施設整備			東日本大震災
市町村	海岸名	計画高	現況天端高	計画	現況天端高	堤防/水門等	海岸防災林	海岸林	浸水高/遡上高
松島町	松島湾・松島	TP+3.12m	TP+3.12m			堤防・護岸	環境	背後森林	
多賀城市	松島湾・七ヶ浜	TP+5.0m	TP+5.0m			堤防・護岸	環境	2,000m	
塩竈市	松島湾・島嶼	TP+3.5m	TP+3.5m			堤防・護岸	環境	背後森林	4.1m（塩釜港）
東松島市	矢本海岸	TP+6.2m	TP+6.2m			堤防・突堤	環境	10,000m	
牡鹿町	牡鹿半島	TP+4.55m	TP+4.55m			堤防・護岸	環境	背後森林	
牡鹿町	牡鹿・島嶼	TP+6.2m	TP+6.2m			堤防・護岸	環境	背後森林	
仙台市	仙台ゾーン	TP+6.2m	TP+6.2m			堤防・離岸堤	環境	10,000m	
名取市	磯・岩沼ゾーン	TP+7.2m	TP+7.2m			堤防・離岸堤	環境	15,000m	5.6~7.2m（仙台空港）
岩沼市	磯・岩沼ゾーン	TP+7.2m	TP+7.2m			堤防・離岸堤	環境	上に含む	5.6~7.2m（推定）/12.0m
亘理町	亘理・山元ゾーン	TP+6.2m	TP+6.2m			堤防・離岸堤	環境	17,000m	
山元町	亘理・山元ゾーン	TP+6.2m	TP+6.2m			堤防・離岸堤	環境	上に含む	
計								54,000m(6.5%)	



久慈川河口・2011.4.26

写真1 岩手県久慈川河口防潮堤左岸から上流を望む。(下は著者撮影)
上の写真は2010.8月の河口（久慈市役所提供）、矢印は津波の進入方向



写真2 岩手県久慈川河口防潮堤左岸から下流を望む。遠望の防潮林の残存している背後地の家屋は被害が比較的小さい。手前は津波が直撃した家屋跡。矢印は津波侵入方向（著者撮影）

4.2 宮城県

宮城県の海岸線延長は約828kmであり、樹林帯の全ては海岸防災林の位置づけはなく環境や背後地の森林の位置づけとなっているため、すべて海岸林として集計すると、合計約54kmである。宮城県では海岸は三陸南沿岸と仙台湾沿岸に区分され、特に、後者は宮城地域、仙台南地域の各海岸線をそれぞれ3つのゾーンに区分している。また、前者のリアス式海岸の三陸南沿岸は気仙沼市稲村浜海岸から女川町塚浜漁港海岸に掛けて海岸林は明確ではなく背後地森林となっている。したがって、防潮林としては算定していない。防潮林(樹林帯)は海岸線総延長に対して約6.5%となっている。

また、岩手県から続く三陸南ゾーンの堤防高は津波・高潮・侵食の計画があるのに対して、松島湾から仙台ゾーン、名取・岩沼ゾーン、亶理・山元ゾーンにかけては津波の計画高はなく、高潮・侵食に対する計画になっている。一方、浸水深が調査でわかり、地盤標高がわかれば平常潮位からの高さや、堤防天端高(T.P)と比較し、津波が堤防施設をどの程度超えたのか推定できる。塩竈市の松島湾・島嶼地区は計画・現況ともT.P+3.5mで、津波浸水深は4.1m(塩釜港)であったが、



写真3 岩手県野田浜海岸・防潮堤・防潮林帯の損壊 (2011.4.26 著者撮影)
長さ1,300mの防潮林(黒松)幅約100m、
計画津波高T.P+12.0m、現況T.P+7.8m
侵食・計画・現況 T.P+10.3m
浸水深10m以上(推定)
遡上高16.9~19.0m

松島湾奥では津波高は小さく被害も比較的小さい。複雑な地形的な特性といえる。また、仙台ゾーンは計画・現況ともT.P+6.2mであるが、名取・岩沼ゾーンでは計画・現況ともT.P+7.2mに対して、津波浸水深は仙台空港では5.6~7.2m(推定)、津波遡上高12.0mであった。仙台空港は標高¹²⁾が2.2~4.2m程度であり、浸水深5.6~7.2mなら堤防を約2.6~4.2m超えていたことになる。名取川河口付近の荒浜河岸の調査では海岸林の樹種は黒松であり、破断・倒伏し、陸域に向かって被害はやや軽減されている(写真4, 写真5)。しかし、開発された住宅地は壊滅的な被害である。東松島市の矢本海岸から阿武隈川河口付近まで断続的に約54kmつづく海岸林は堤防とともに高潮に対する機能、環境機能の位置づけであり、津波高の計画は存在していない。今後、津波対策のために、これらの海岸林を含む防潮林機能の新たな位置づけとして加えることが期待される。



写真4 仙台市若林地区荒浜海岸(Google earth)
樹林(黒松)植生概要 28本(400m²)
平均目通し高さ直径34cm
平均樹高 12.1m
植生密度 700本/ha



写真5 荒浜海岸周辺の防潮林調査 (2011. 8. 23) (著者撮影)
破断、倒伏した防潮林、遠方は海浜。樹幹部の破断箇所は地表面よりおおむね1～2m付近に見られる。

5. 防潮林の水理実験による検討

5.1 実験方法および条件

実験対象とした防潮林は、仙台市若林区荒浜海岸の樹林帯幅50m、樹高10mを想定した(写真4, 5)。津波は海浜から陸域に駆け上がった状態を想定している。実験は長さ1500cm、幅56cmの水平のコンクリート水路に縮尺1/50の木製円柱の防潮林の模型を設置した(図1)。防潮林模型(直径6mm・樹高200mm・千鳥状に配置)は13mm高い場所に設置し、樹林帯幅1000mmに樹林前から背後まで津波水位、水圧、水平波圧を4箇所(測点No. 1, 2, 3, 4)で計測した。ここでは実験施設の条件から波高最大5mの場合を想定し、防潮林の鉛直方向2～10cm間に、各測点ごとに

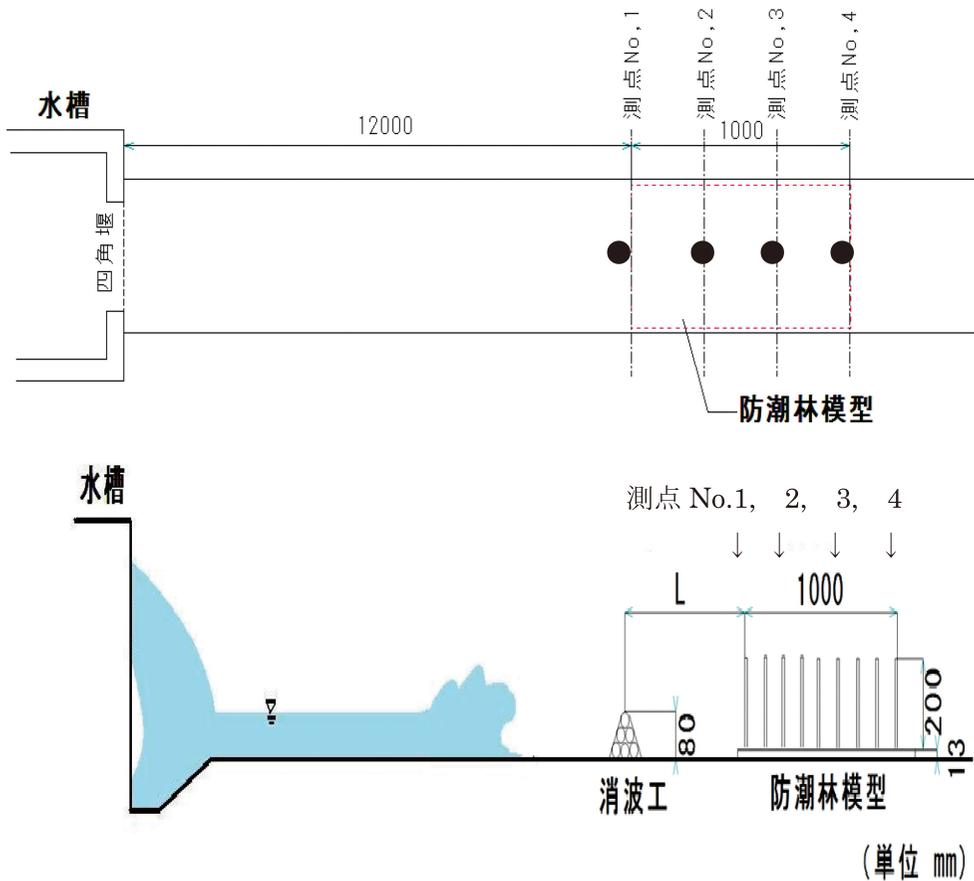


図1 津波模型実験水路(平面図・側面図) ●↓: 水圧、波力の測定位置

7か所で測定した。波高の小さい場合は暫時、防潮林のNo. 1～4の陸側に向かって測定箇所を少なくした。図1の平面図および側面図に測定した箇所を明示した。水圧測定では各測点の底面に設置している。

計測器は圧力計(SSK(株)社製)、ひずみ測定器(DC-104R)は東京測器研究所(株)を使用した。圧力計の規格は固有振動数3.5KHz(0.1Kgf/cm²)、出力電圧100mVRO、再現性0.2%RO、温度特性0.05%RO/°C(0～40)、入出力抵抗500Ω、およびブリッジ電圧6VDCである。

なお、実験水路の実際の換算粗度は0.027であるが、粗度調整はしていない。樹林内の換算合成粗度係数n_t=0.0914である。

樹林密度は荒浜海岸での実測から700本/haとした。防潮林の単位幅あたりの厚みは首藤の解析⁶⁾よりdn=105本・cmである。消波工は樹林前面から沖側の距離Lを変化させ、現地スケールで15m, 30m, 50m, 70m, 100mの5ケースを想定し検討した。消波工は透過型、不透過型の2ケースとした。津波(段波)は防潮林内部で現地スケールの浸水深が5m, 4m, 3m, 2.5mになるように水槽の堰水位を調整(流量一定)して流れを段波で流下させた。以下、浸水深が5mのケースを検討した。表3に実験条件の一覧を示した。なお、実験の再現性を図るため各測点、ポイントごとに3回実験を行い、精度を高めることに努めた。

5.2 解析方法

津波による防潮林への水平波力の作用と抗力の算定は原田ら⁷⁾、平石ら¹³⁾の下記の式(1)および(2)により検討した。ここで水平波力は防潮林に侵入する津波の水平方向の波力が樹林の鉛直方向に作用したものである。

表3 津波(段波)の実験条件

	流量	波高(実験値)	波高(実際)	防潮林
Case1	68.7L/s	10, 8, 6, 5cm	5, 4, 3, 2.5m	あり
Case2	68.7L/s	10cm	5m	+消波工

$$P = \frac{1}{2} \rho c_d v^2 h \tag{1}$$

$$C_d = 8.4 \frac{V_0}{V} + 0.66 \tag{2}$$

ここで、P:抗力(N/m)、C_d:抗力係数、V:任意区間の水の体積、V₀:任意区間の樹林の体積、ρ:海水密度(kg/m³)、v:流速(m/s)、h:浸水深(m)

流速と水圧から抗力係数C_dを算出すると、防潮林の抗力係数C_d=0.892を得た。この値は一般値と比較すると、球:0.6～0.7、円柱:0.8～1、四角柱:2であり、ほぼ妥当な値といえる。防潮林前後の抗力Pの低減率は47.9%となった。

5.3 実験結果

(1) 消波工なしのケースの津波の挙動

前述した調査結果⁵⁾や既往研究^{6,7)}より樹林前面の水位、水圧とも波高が高いほど樹林の破断・倒伏も著しく、その後、背後地に向かって低減している。また、樹林密度が大きいほど反射波も大きいことが分かっている⁸⁾。実験条件は、侵入する津波(段波)の流速V_iは1.85m/s(13.1m/s)、Fr=1.916であり、樹林帯内の流速V_v=1.67m/s(11.85m/s)、Fr=1.863である。()はプロトタイプに換算した流速である。

本実験では、最初に、防潮林の津波低減効果を把握するため防潮林のみを設置し、津波波高を5m, 4m, 3m, 2.5mの4ケースで各測定箇所の水圧を測定している。その結果を図2に示した。

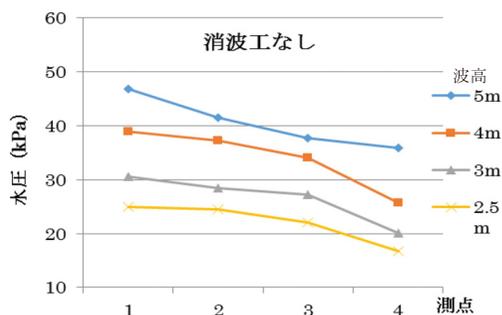


図2 津波の波高変化に伴う樹林内の水圧変化

水圧の低減率は測点1と4から算出すると30～35%であった。

次に、防潮林が津波による破断・倒伏を受ける水圧および水平波力とその箇所を推定するため、はじめに消波工なしのケース、即ち、防潮林だけのケースの津波の侵入に伴う各測点の水圧の時間変化と水平波力の測定を行った。さらに、透過型、不透過型のケースでも同様に実施した。

図3に消波工なしで、測点No. 1における水圧の時間変化を実験値で示した。計測は0.2秒毎に測定をしているため時間軸は1/5秒単位であり、横軸の100は20秒、200は40秒となる。

この実験は津波が樹林へ侵入する瞬間的な水圧変化を抽出することを目的としている。横軸は計測開始からの時刻を示し、縦軸是水圧を示す。同図によると、第1波は1.4s後に、水圧がピークを迎え、第2波は樹林帯の反射波は3.4sec後に出現したことを示している。その後は微かに振動しながら減衰し、周期0.75s程度の振幅が確認できる。以降、波高が小さくなるに従い第2波の間隔は長くなる。減衰周期は流体の水面振動の強弱を示し波高が大きいほど時間が早くなっている。

更に、樹林前面の測点No. 1から、陸側の樹林端部No. 4までの樹林への鉛直方向の水平波力(y)の測定を行った。図4は測点No. 1～4までの防潮林の浸水深と鉛直方向の水平波力の関係を示す。水平波力の最大値は測点No. 1, 2では水深5cmの箇所で各々最大値1,995 Pa, 1,696 Pa, を示している。浸水深が2cm以下(No. 1, 2)

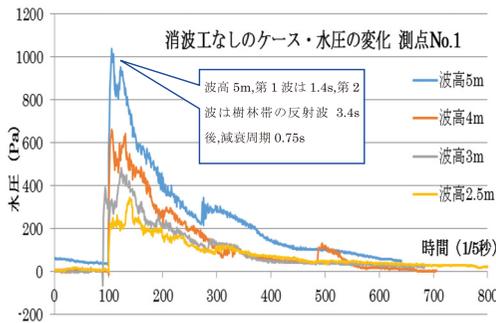


図3 津波(段波)の水圧変化(測点No. 1)

と最大値以降では水平波力は減少する。この要因は、津波の水面近傍での碎波による空気の混入などによるものと考えられる。なお、この関係は上に凸の2次曲線の近似式で示される。樹林帯の陸側に当たる測点No. 3, 4では水深2cm, 1cmの低位置で最大値となり樹林の高位置まで直線的に低減する。この関係は1次式で示される。実験に

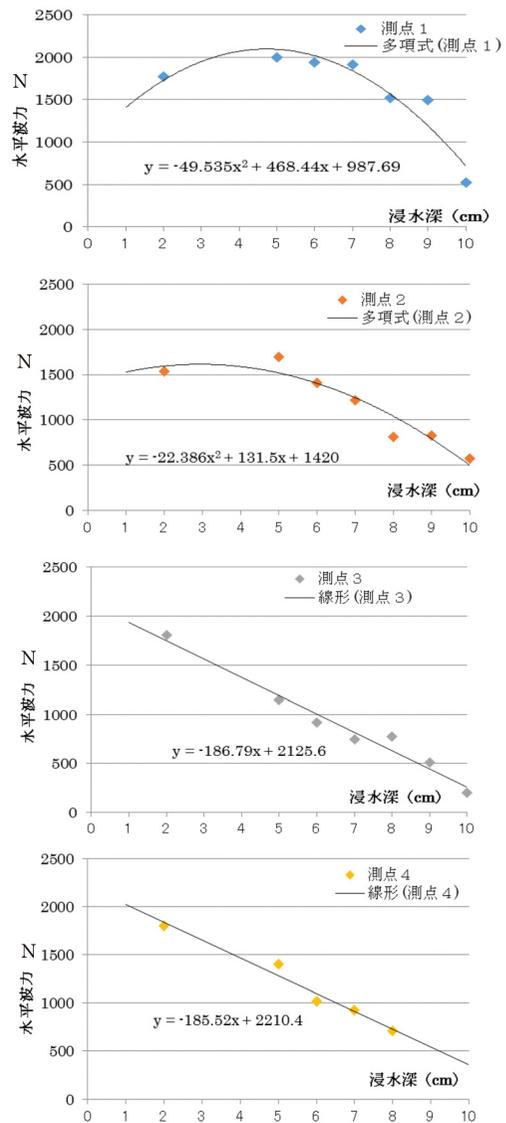


図4 防潮林の浸水深と樹林鉛直方向の水平波力(N)の関係

よる水平波力 y と水深 x の外挿式は下記の (1), (2) 式のとおりである。

$$\text{測点 1, 2} \quad y = -ax^2 + bx + c \quad (1)$$

$$\text{測点 3, 4} \quad y = -dx + e \quad (2)$$

ここで, y : 水平波力 x : 水深
 a, b, c, d, e : 樹林の特性係数

従って, 測点 No. 1, 2は樹高の5~3割地点に, No. 3, 4では樹高の2割以下の地点に, 最大水平波力を受ける。この水平波力が鉛直方向の積分量として作用することにより破断・倒伏を生じさせている要因の一つと考えられる。荒浜海岸の調査周辺の写真5にも示したように樹林の樹幹部の破断箇所は地表面より概ね1~2m付近に集中していた。更に, 図5に示すように測点No. 2における波高5mの水圧変化をみると津波の侵入初期には瞬間的に林床部で負圧が発生している。測点No. 3, 4でも同様である。この現象は津波が進入する水平波力とは反対か上向きに瞬間的に負圧が発生していることになり樹林の破断・倒伏を引き起こす別の要因の1つと考えられる。これは津波の先端部で瞬間的に空気の激しい混入が発生して, 正圧を受ける状態にない現象が起きていると考えられる。

(2) 消波工による津波の低減効果

防潮林の沖には一般的にリーフ, 防潮堤, 消波

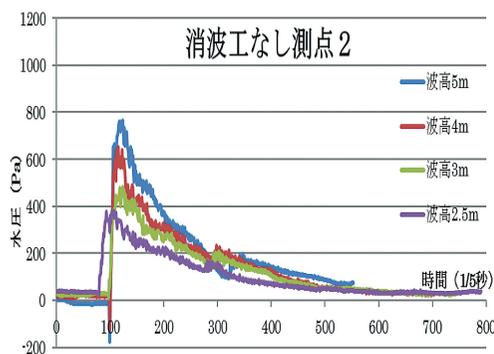


図5 津波(段波)の水圧変化(測点No. 2)

工(テトラポット)などが設置されている。これらは海岸線より沖側の水中や渚に設置されている。本実験の消波工は, 規模・形状は今後の検討によることとして, 1) 消波工なしのケースの実験を踏まえて, 消波工の高さを樹林の高さの4割の高さと設定した。この根拠は樹高20cmのモデルの場合で予備実験を行い, 水平波力が最大に近い高さを事前に検討し, 消波工の高さとした。消波工の素材と形状は, 高さ80mmの蛇籠(6段重ね)を三角形断面に積み上げた透過型, 不透過型の消波工として, これを樹林帯前面より海岸線側に距離 L を変化させて実験することとした。

図6には, 消波工と樹林との間隔 L に伴う測点No. 1における水平波力の変化を示した。透過型では水平波力は50m地点で1,195 Pa, 不透過型は30m地点で1,050 Paとなり, それぞれ最小値を示した。透過型より不透過型の方が水平波力は低減することがわかった。これは, 不透過型は透過型に比べ反射波が大きくなり, 消波工を超える波のエネルギーが小さくなっているものと推定される。しかし, 不透過型の $L=100m$ では2,144 Paとなり, 消波工なしのケースの波圧と同程度とな

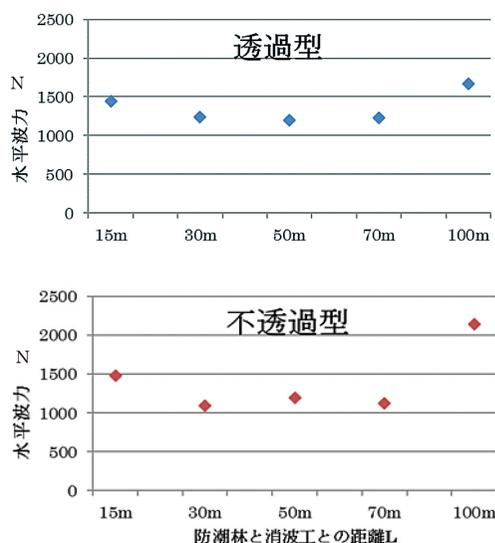


図6 消波工と防潮林との距離 L (15m~100m) で津波により防潮林測点No. 1に作用する水平波力 (N)

り低減効果が無いことが分かる。これは消波工を乗り越えた津波は慣性力を維持したまま樹林に到達していると考えられる。また、間隔 L が短いと越波した衝撃水圧を受けやすくなると考えられる。以上のことより、消波工と樹林との間隔を長くしても、短か過ぎても水平波力が大きくなり低減効果を発揮しないことが推察される。樹林前面の水平波力を最小にする消波工の位置があることが推定される。

6. まとめ

本報告は現地調査・行政資料などによりまとめているが、津波による諸構造物や防潮林の激しい破壊状態を目の当たりにし、現場調査では十分な調査ができてないことをまとめの段階で改めて痛感した。しかし、今後、防潮林が機能するためには一般的に、50~100年が必要になる¹⁴⁾。将来、ハード対策と自然との共生の技術の深化を計り、防潮林の減災効果に期待したいと考え、下記のように要約する。

(1) 防潮林調査では岩手県⁹⁾は海岸線延長が約700kmであり、海岸防災林は3.8km、海岸林2.5kmの合計6.3kmである。海岸線総延長の約0.9%である。宮城県¹⁰⁾の海岸線延長は828kmであり、樹林帯全てが海岸防災林の位置づけではなく環境や背後地の森林の位置づけである。すべて海岸林として集計すると計約54kmであり、防潮林は海岸線延長の約6.5%である。防潮林の被害規模は比較的津波高の小さい松島湾・仙台湾の一部を除いて壊滅的な被害と言える。

(2) 防潮林の水理実験では、仙台市若林区荒浜海岸の現地調査から樹林帯幅50m、樹高10mを想定し、縮尺1/50による実験を行った。樹林の鉛直方向に最大水平波力は樹林前面から測点No. 1, No. 2は樹高の5~3割地点に、樹林内から樹林端部の測点No. 3, 4では樹高の2割以下の地点に最大水平波力を受ける。更に、波高5mの水圧変化は津波侵入初期には林床部では負圧が発生しているものと考えられる。破断・倒伏はこれらの要因によって生じているものと推定される。なお、この樹林鉛直方向の水平波力と浸水深

の関係は上に凸の二次曲線で、また、樹林内から樹林端部では一次式で近似されることがわかった。

将来、防潮林の被害を軽減し、その効果を高めるために防潮林前面に消波工を設置することを考え、水理実験を行った。消波工は高さ80mmの蛇籠を三角形断面に積み上げ、透過型、不透過型のタイプを樹林前面より海岸線側に距離 L を変化させて実験を行った。その結果、消波工と樹林との間隔を長くしても、短か過ぎても水平波力が大きくなり低減効果を発揮しないことが推察される。水平波力は透過型では50m地点で、不透過型は30m地点で最も低減する結果が得られた。

最後に、調査・研究をまとめるにあたり、資料調査では岩手県庁、宮城県庁、久慈市、および現場調査では国際航業(株)の各機関の協力をいただきました。また、当時前橋工科大学大学院生児島正和君(現:池下工業(株))、学部生吉江悟君(現:塩尻市役所)には調査、水理実験ともご協力いただき感謝いたします。

参考文献

- 1) 巨大津波6000年で6回(2011.8.22): 毎日新聞朝刊14版, 1.
- 2) 中央防災会議(2011年9月28日): 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, pp.3-6.
- 3) 内閣府政策統括官室(2011年12年): 東日本大震災によるストック毀損額の推計方法について, pp.1-14.
- 4) 東北関東大震災調査団調査報告書(2010): 土木学会水工学委員会, <http://committees.jsce.or.jp/hydraulic/>
- 5) 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, pp.465-469.
- 6) 首藤伸夫(1992): 津波強度と被害, 東北大学津波工学研究報告第9号, pp.101-136.
- 7) 原田憲治, 河田恵昭(2004): 津波災害低減のための防潮林(自然力)の活用について, 京都大学防災研究所年報NO.47, pp.273-280.
- 8) 飯村耕介・田中則夫・谷本勝利・田中茂信(2010): 樹林密度の異なる植生帯を組み合わせたときの津波軽減効果に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学)第66巻, No.1, pp.281-285.

- 9) 岩手県・海岸保全基本計画 (2009年10月13日) :
<http://www.pref.iwate.jp/view.rbz?nd=2251&of=1&ik=3&pnp=17&pnp=66&pnp=782&pnp=2251&cd=59348>
<http://www.pref.iwate.jp/~hp0605/hp0605/kaigan/.../tenp2.htm>
- 10) 宮城県・海岸の概要 (2010)
http://www.pref.miyagi.jp/kasen/kg_gaiyo.html
- 11) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ,
土木学会海岸工学委員会・地球惑星連合,
<http://www.coastal.jp/ttjt/>
- 12) 国土交通省東北地方整備局, 港湾空港部, 仙台
空港復旧・復興のあり方検討委員会 (2011年9
月)
[http://www.pa.thr.mlit.go.jp/kakyoin/info/revival_
policy.html](http://www.pa.thr.mlit.go.jp/kakyoin/info/revival_policy.html)
- 13) 平石哲也, 南 靖彦, 田中政典 (2006) : グリー
ンベルトによる津波力の軽減に関する水理的検
討, 港湾空港技術研究所資料, No.1124, pp.5-
6.
- 14) 社団法人「日本の松の緑を守る会」
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/higai/seisyou.html>

(投稿受理:平成25年3月25日
訂正稿受理:平成25年9月6日)