

津波による防潮林被害と水理実験による検討 -東日本大震災3.11巨大津波による被害調査-

土屋十罔*・吉江悟*・児島正和**

* 前橋工科大学社会環境工学科

** 前橋工科大学大学院博士前期課程

1. はじめに

2011年3月11日午後14時46分、太平洋三陸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⁾。これに伴う巨大津波が発生し、岩手、宮城、福島、茨城および千葉を中心として太平洋岸に死者・行方不明者計2万人近い人命を奪った。この地震は「津波地震」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。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。調査結果の速報値²⁾は土木学会水工学委員会のホームページに詳細が掲載されている。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、被害は多重的・複合的かつ広域的に甚大な被害を与えた。そのため本報告では、対象地域と検討内容の絞り込みを行い、上記、②河川護岸構造物などの被害関係、③による防潮林の被害・減災効果につい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。本報告では後者の③に関して報告する。

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、水門などともに、「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、侵食に対する陸域(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、環境としての機能から景観・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。本研究報告では下記の既往研究の成果から防潮林を海岸保全施設の認識にたち、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て津波(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)^{3) 4)}、原田ら(2004)の研究⁵⁾及び飯村・田中ら(2010)の研究⁶⁾等によって明らかにされている。即ち、前者(首藤 1985)は、1)樹木の直径が10cm以下では津波浸水深が4.65m以上になると折損する。

2) 直径が 10cm 以下では浸水深が 4m 以上になると倒伏・折損する。3) 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算定している。また, 首藤(1992)では津波高さと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, 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 巨大津波でもこれらを実証し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)。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, 浸水被害に関係する浸水深を 5～6 割, 流体力による被害に関する流速は 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さ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⁷⁾と宮城県⁸⁾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会調べと, 毎日新聞2011. 4/15, 4/24および東京新聞2011. 7/3, 及び郡司准教授(東大地震研究所)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公表されている浸水高, 遡上高(推定値)とした。これら行政資料をもとに作成した表-1, 2を示す。

(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少ない。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。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, 計画に対して3倍以上の津波に襲われたことになる。防潮林1, 700mのうち1本松は象徴的なシンボルとなった。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に対してそれぞれ浸水深9. 5～10. 8m, 遡上高31. 9m(推定)である。いずれにしても現況高を約5倍以上の津波が襲ったことになる。

(2) 宮城県

宮城県の海岸線延長は828kmであり, 樹林帯の全ては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となっているため, すべて海岸林として集計し, 合計約54kmである。この集計には南三陸ゾーン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, 岩手県から続く南三陸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・岩沼・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。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)であり, 0. 6m上回る比較的小さな津波となっている。松島湾奥では津波高は小さく被害も比較的小さい。地形的な特性といえる。一方, 仙台ゾーンは計画・現況ともT. P+6. 2mであるが, 津波浸水深 5. 6m～7. 2m(仙台空港)であった。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などと同様5. 6m～7. 2m(推定), 津波遡上高12. 0mであった。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。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。

5. 防潮林の水理実験による検討

(1) 実験方法および条件

実験は長さ1500cm、幅56cmの水平のコンクリート水路に木製円柱の防潮林の模型の縮尺1/50で設定した(図-1)。仙台市若林区荒浜海岸の樹林帯幅50m、樹高10mを想定した。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。水路の実際の換算粗度は0.027ですが、調整はしていない。防潮林模型(直径6mm・樹高200mm・千鳥状に配置)は高い場所に設置し、樹林帯幅1000mmに樹林前面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。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。

樹林密度は荒浜海岸での実測から 700 本/ha とした。防潮林の厚みは首藤の解析³⁾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、プロトタイプでは15m, 30m, 50m, 70m, 100mの5ケースを検討した。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。

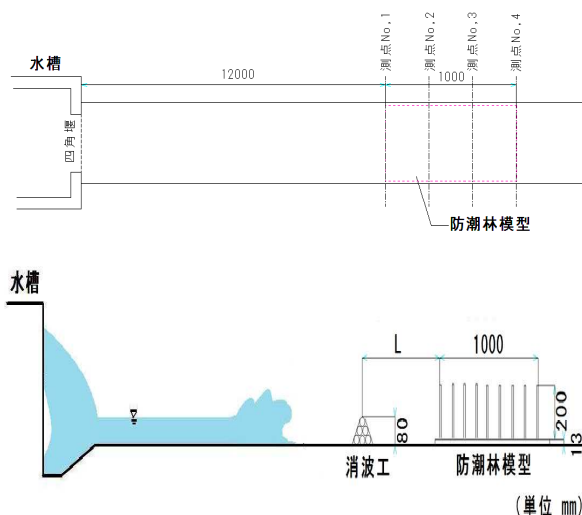


図-1 津波模型実験水路(平面図・側面図)

(2) 実験結果

1) 消波工なしのケースの津波の挙動

調査結果や既往研究より樹林前面が水位、水圧とも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。本実験では樹林が津波による破断・倒伏を受ける水圧(水平波力 y)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変化と流体力を把握した。沖側の樹林前面の測点No. 1から、陸側の樹林端部No. 4までの樹林の鉛直方向の水平波力 y の測定を行った。

実験条件は、侵入する津波(段波)の流速 V_f は 1.85m/s (13.1m/s), $Fr=1.916$ であり、樹林帯内の流速 $V_v=1.67$ m/s (11.85m/s), $Fr=1.863$ である。図-2は波高5mの津波(段波)の測点No. 1直前における侵入波形を水圧の変化として示す。第1波は1.4s後、第2波は樹林帯の反射波3.4sec後のピークを示す。水圧が振動しながら減衰する周期は0.75sである。以降、波高が小さくなるに従い第2波の間隔は長くなる。

図-3は測点No. 1~No. 4まで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, No. 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)と最大値以降、水平波力は減少する。津波の水面近傍では碎波による空気

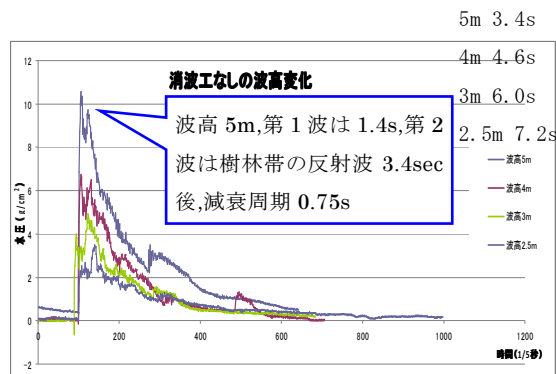


図-2 津波(段波)の波形(測点No. 1直前)

の混入などによるものと考えられる。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、No. 1, No. 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。これによって破断・倒伏が生じているものと考えられる。更に、図-4 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侵入初期には林床部で不圧が発生していることになる。No. 2, 3, 4 でも同様である。これは津波の水平波力とは反対の力が発生していることになり樹林の破断・倒伏を引き起こす要因の1つと考えられる。

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さに設置されている。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。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-5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。しかし、不透過型の $L=100\text{m}$ では2,144Paとなり、消波工なしのケースの波圧と同程度とな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推定される。以上のことから、消波工と樹林との間隔を長くしても、短じかくし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を示している。

6. おわりに

研究報告は現地調査・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の激しい破壊

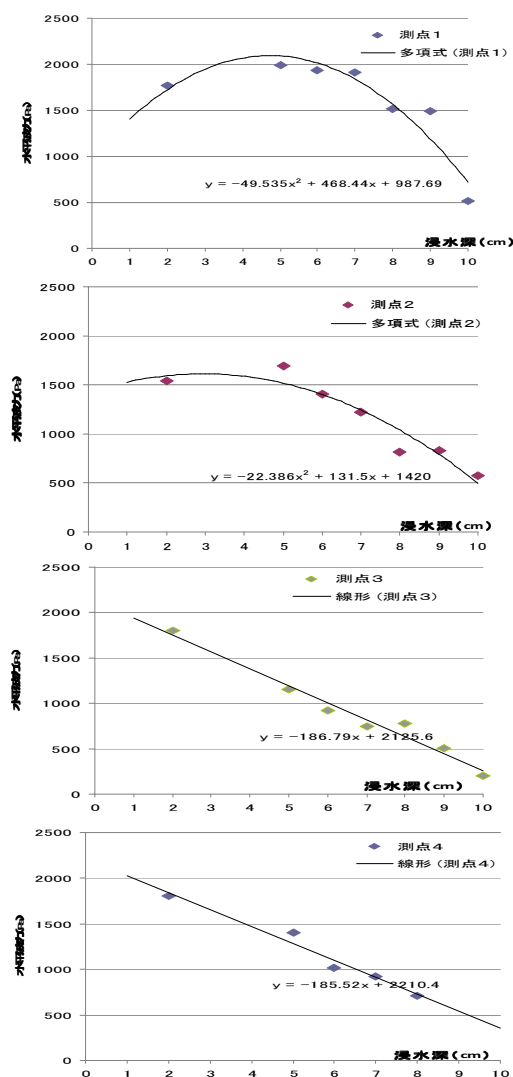


図-3 浸水深と樹林鉛直方向の水平波力の関係

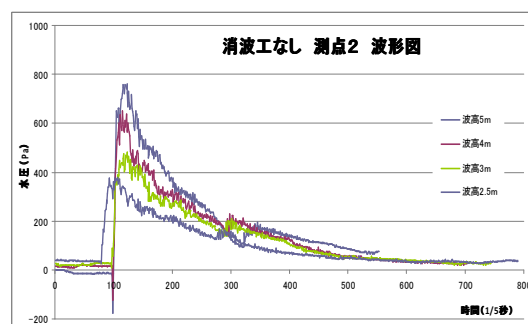


図-4 津波(段波)の波形(測点 No. 2)

の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、将来、この分野のハード対策と自然との共生の技術の深化と、防潮林の減災効果に期待してまとめることとした。

1) 防潮林調査では岩手県は海岸線延長が約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。最大水平波力は樹林前面からNo. 1、No. 2は樹高の5割地点に、樹林内から樹林端部の 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不圧が発生している。破断・倒伏はこれらの要因によって生じているものと考えられる。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の近似式で、また、樹林内から樹林端部では一次式で示されることがわかった。

今後、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、短じかくし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わかった。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ことがわかった。

報告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）の各機関にはご協力いただき感謝いたします。

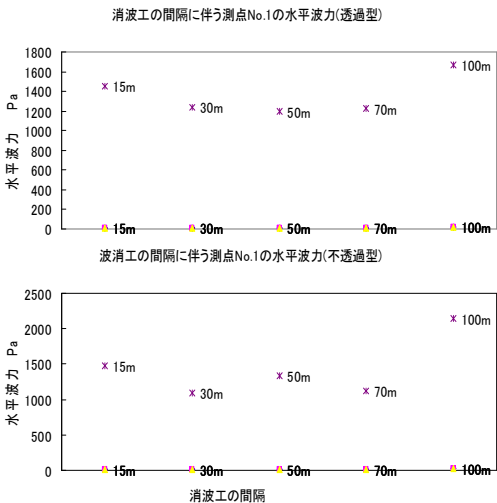


図-5 消波工と樹林との間隔 (15m～100m) に伴う水平波力

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	海岸線700km	津波		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	浸水深/遡上高
種市町	鹿糠地区	(T.P+12.0m)			7.3m		100m		5～9m
久慈市	麦生地区			T.P+6.0m	T.P+6.0m		500m		
久慈市	漁港海岸	T.P+8.0m	T.P+8.0m	T.P+4.3m		570m/450m		800m	8.6m/13.4m
野田村	野田海岸	(T.P+12.0m)	T.P+7.8m	T.P+10.3m	T.P+10.3m	1,100m/水門	1,300m		/16.9～19.0m
野田村	土内地区			T.P+5.9m	T.P+5.9m		150m		
野田村	下村地区			T.P+5.9m	T.P+5.9m		100m		
野田村	浜山地区			T.P+5.2m	T.P+5.2m		150m		
大槌町	波板地区			T.P+8.35m	T.P+4.5m		500m		
大船渡市	本郷地区				T.P+2.2m		350m		9.5m/10.8m/31.9m
大船渡市	赤崎地区				T.P+2.50m		250m		9.5m～11.8/31.9m
大船渡市	赤土倉地区				T.P+5.63m		300m		9.5m/31.9m
陸前高田市	高田松原海岸	T.P+5.5m	T.P+5.5m				1,700m		15.8 /21.5m
陸前高田市	沼田地区				T.P+2.60m		100m		15.8 /21.5m
計	海岸線700km						5,500m	800m(0.9%)	

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	T.P+ 4.5 m	T.P+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	T.P+ 4.62 m	T.P+ 4.62 m			胸壁		環境・黒 松	/15.9m
河北町	横須賀海岸	T.P+4.5m		T.P+ 4.5 m		堤防・リーフ	環境・植生	保安林	/15.9m
女川町	塚浜漁港海 岸	T.P+2.9				胸壁・陸 間	鳴り砂		8.6m/15.6m
牡鹿町	三陸南沿岸	T.P+4.5m				堤防・離 岸堤	環境		

松島町	松島湾・松島	T.P+ 3.12 m	T.P+ 3.12 m			堤防・護岸	環境	背後森林	
多賀城市	松島湾・七ヶ浜	T.P+5.0m	T.P+5.0m			堤防・護岸	環境	2,000m	
塩竈市	松島湾・島嶼	T.P+3.5m	T.P+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	T.P+6.2m	T.P+6.2m			堤防・突堤	環境	10,000m	
牡鹿町	牡鹿半島	T.P+ 4.55 m	T.P+ 4.55 m			堤防・護岸	環境	背後森林	
牡鹿町	牡鹿・島嶼	T.P+6.2m	T.P+6.2m			堤防・護岸	環境	背後森林	
仙台市	仙台ゾーン	T.P+6.2m	T.P+6.2m			堤防・離岸 堤	環境	10,000m	5.6m～7.2m
名取市	名取・岩沼ゾ ン	T.P+7.2m	T.P+7.2m			堤防・離岸 堤	環境	15,000m	
岩沼市	名取・岩沼ゾ ン	T.P+7.2m	T.P+7.2m			堤防・離岸 堤	環境	上に含む	/12.0m
亶理町	亶理・山元ゾ ン	T.P+6.2m	T.P+6.2m			堤防・離岸 堤	環境	17,000m	
山元町	亶理・山元ゾ ン	T.P+6.2m	T.P+6.2m			堤防・離岸 堤	環境	上に含む	
計								54,000m(6.5 %)	

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) 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/>
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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=5934>
- 8) 宮城県・海岸の概要(2010): http://www.pref.miyagi.jp/kasen/kg_gaiyo.html