宮城県岩沼市における海岸林を活用した 多重防御の津波被害軽減効果

大平浩之¹・林 晃大²・山下 啓³・今村文彦⁴

¹学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail:hiroyuki.ohira.s5@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学助手 災害科学国際研究所 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

³正会員 東北大学助教 災害科学国際研究所 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

⁴正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

宮城県岩沼市における海岸林の津波減衰・減災機能、並びに、海岸林と複数の防災施設との組み合わせによる減災機能について、津波数値解析に基づき検討した。まず、海岸林が発揮し得る、浸水深や流速の減衰効果、津波到達時間の遅延効果および建物・人的被害率の低減効果を評価した。次に、現況の多重防御整備事業が、2011年東北津波に対しても一定の津波減衰効果を有することを確認し、垂直避難場所としての避難丘やそれらを結ぶ園路といった防災施設を多段的に整備することにより、特に、背後地における流速の低減および津波到達時間の遅延に対して効果的であり、樹木倒伏の抑制にも繋がることがわかった。避難丘については、防潮堤の背後近くでの整備が有効であった。これら防災施設の特性を吟味し組み合わせることが津波減衰に対して有効である。

Key Words :Iwanuma City, coastal forest, multiple defense system, hazard evaluation, numerical simulation, tsunami disaster mitigation

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波の教訓を踏まえて、多重防御による津波対策の重要性が益々高まっている。この中で、海岸林などを活用した多重防御の津波防災地域づくり整備事業が進められているが、海岸林が有する津波減衰・減災機能^{1)・2)}や他の機能との組み合わせ(複数)を評価した上で展開している整備事業は少ない。例えば、宮城県岩沼市では、非居住区域に指定した沿岸域の空間や既存施設に、新規施設を付加する形で多重防御整備事業を進めている。こうした現況事業を様々な観点に基づき評価してこそ、今後、津波が想定される地域において新規事業を論理的に進めるための基礎情報になる。

他方、空間を有効活用する多重防御は、人口分布や都市構造の変化に応じて多段的に防災施設を付加できる長所を有するものの、その最適な規模や組み合わせについては詳細な検討が必要である。例えば、防災施設の組み合わせに関して、奥村ら³⁾は道路や鉄道の盛土構造物が有する津波減衰効果を調べるために、海岸堤防と内陸盛土構造物の多重防御効果を評価している。また、久保田ら⁴⁾は海岸丘と海岸林の組み合わせによる津波減衰効果について水理模型実験を用いて評価している。しかしなが

ら、前述の多重防御の長所である将来への拡張性や整備レベルに焦点を当てた検討は少ない。

そこで、本研究では、宮城県岩沼市を対象として、まず、海岸林が有する津波減衰効果や人的・建物被害の軽減効果を、2011年東北津波による被害実績と津波数値解析に基づき評価する。そして、現況の多重防御整備事業に多段的に防災施設を付加するシナリオを設定した津波数値解析を行ない、津波減衰に効果的な多重防御のあり方を検討する。

2. 宮城県岩沼市における多重防御整備事業

2011年東北津波による被災地域において、平野部の多くでは多重防御整備事業が進められている。仙台平野に位置する岩沼市では、官民挙げた海岸林整備に始まり、防潮堤、千年希望の丘(避難丘15基、園路)、貞山堀、嵩上げ道路といった多段的な防災施設整備が計画・着工されている。ここで、「千年希望の丘」とは15基の避難丘を園路で結ぶ岩沼市の多重防御施設群である。この丘は、松島湾内の宮戸島や桂島などの島群が一種の防波堤となり津波を減衰させたこと、岩沼海浜緑地内の高さ約10mの丘に避難したことにより数名の人命が救われ

たことを教訓として計画されたものである^{5,9}。

3. 数値解析手法

岩沼市（図-1）に来襲した 2011 年東北津波を対象として、海岸林が有する津波減衰・減災効果および多重防御の効果を検討する。そこで、まず、当該地域における被害痕跡を説明し得る最適な津波波源を決定するために、藤井・佐竹モデル Ver 8.0⁷⁾、東北大学モデル Ver 1.2⁸⁾ および JNES モデル⁹⁾ の三つの津波波源モデルを用いて 2011 年東北津波の再現計算を行なった。計算対象領域は、ネスティングにより計算メッシュサイズを細かくし、岩沼市が位置する最小メッシュ領域の格子間隔は 5 m である。なお、破堤を考慮した被災後の地形を対象とする。

津波数値解析に海岸林の効果を考慮するために、流体抵抗として、原田・今村¹⁰⁾ が提案した式(1)、および、原田・河田¹¹⁾ が提案した式(2) の等価粗度モデルを適用した。海岸林植生地域は 2009 年時の Google Earth の画像により抽出した（図-1 の緑色で示した領域）。また、田畑・家屋についても同様に抽出し、小谷ら¹²⁾ の粗度係数を設定した。

$$C_D = 8.4 \frac{V_0}{V} + 0.66 \quad \left(0.01 < \frac{V_0}{V} < 0.07 \right) \quad (1)$$

$$n_{forest} = \left[\frac{C_D}{2g} \left(\frac{Num_{tree}}{dxdy} \right) AD^{1/3} \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここで、式(1)、式(2) 中の V は海岸林が存在する区間の水面下の全体積、 V_0 は水面下の海岸林の全体積、 C_D は抗力係数、 $Num_{tree}/dxdy$ は単位底面積当たりの樹木の本数、 A は樹木一本当たりの投影面積、 D は津波の浸水深である。但し、本計算では、樹木の幹のみを対象としており、枝葉の影響を無視する。海岸林の樹木の諸元は、仙台平野を対象とした現地調査結果¹³⁾ 及び樹齢を考慮した値¹⁴⁾ である（表-1）また、クロマツを対象とした曲げ・引き倒し試験結果¹⁴⁾ から得られた、次式に示す倒伏限界モーメント M_c を用いて樹木の倒伏を考慮した。

$$M_c = \beta \frac{\sigma \pi d_{tree}^3}{32} \quad (3)$$

ここで、式(3) 中の β は群生環境係数、 σ は曲げ強度、 d_{tree} は胸高直径であり、 $\beta = 1.35$ 及び $\sigma = 28.3 \text{ N/m}^2$ を与えた。また、津波が海岸林に作用する外力モーメントは浸水深の高さと樹高の関係により次式で定義される。

$$M = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 d_{tree} AD \quad (D \leq h_{tree}) \quad (4)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 d_{tree} A h_{tree} \quad (D > h_{tree}) \quad (5)$$

ここで、式(4)および式(5)中の ρ は海水の密度、 u は流速、 h_{tree} は樹高である。本計算における外力モーメントが樹木の倒伏限界モーメントを超えた場合、式(2) に示した

図-1 研究対象地域：宮城県岩沼市 (Image©TerraMetrics)

表-1 海岸林の諸元

参考文献	胸高直径 (m)	樹高 (m)	樹林密度 (本/m ²)	樹齢 (年)
今井ら (2009)	0.093	7.4	0.471	-
原田・河田 (2005)	0.07	4.0	0.7	10
	0.09	7.0	0.3	20
	0.11	9.5	0.3	30
	0.13	11.5	0.3	40
	0.15	13.0	0.3	50

表-2 各断層モデルの K 値および κ 値

		JNES モデル	藤井・佐竹 モデル Ver 8.0	東北大学 モデル Ver 1.2
スケーリング 前	K	0.54	0.74	0.65
	κ	1.41	1.38	1.35
スケーリング 後	K	1.10	1.18	0.91
	κ	1.60	1.61	1.57

海岸林の粗度係数は一定値 ($n_{forest} = 0.025 \text{ s/m}^{1/3}$) とする。

より妥当な断層モデルを検討するために、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ¹⁵⁾ の調査点 82 箇所（岩沼市周辺）における痕跡高と解析結果を用いて、三つの断層モデルの幾何平均 K と幾何標準偏差 κ を算出し¹⁶⁾、三つの断層モデルの再現性を比較した。表-2 に示す通り、痕跡高と計算値のばらつきである κ 値は東北大学モデル Ver 1.2 が最小である。しかしながら、浸水深は痕跡高より過大である。そこで、三つの断層モデルの 10 個のセグメントのすべり量に各断層モデルの K 値を乗じ、スケーリングを行なった。津波痕跡高と計算値の整合性は東北大学モデル Ver 1.2 が最も高いため、本計算の断層モデルとして用いることとした。

4. 多段階整備での海岸林の津波減衰・減災効果

震災当時における海岸林が有した被害軽減効果を評価する。潮位条件として震災当時の実績値 (TP. -0.42 m) を与えた。図-2 に、図-1 における Point 1（矢野目地区）での地震発生 70 分以降における津波浸水深と流速の時間変化を示す。海岸林の直ぐ背後の Point 1 では、海岸林

図-2 Point 1における津波浸水深と流速の時間変化（海岸林の流体抵抗として、海岸林がない場合、表-1における今井ら(2009)の海岸林諸元および原田・河田(2005)の樹齢50年の海岸林諸元を考慮している。）

表-3 岩沼市の各地区における建物および人的被害率の推定値（海岸林ありと海岸林なしとの差分を示す。被害率が最小および最大である事例に、それぞれ、実線下線および点線下線を付す。）

地区名	対象	海岸林なし	樹齢10年	樹齢20年	樹齢30年	樹齢40年	樹齢50年	今井ら2009
矢野目	建物	33.7%	+0.8%	+0.8%	+0.7%	+0.6%	+0.4%	+0.7%
	人的	12.4%	+0.6%	+0.6%	+0.5%	+0.5%	+0.3%	+0.6%
二野倉	建物	79.3%	-1.3%	-1.4%	-1.3%	-1.5%	-1.8%	-1.3%
	人的	72.0%	-3.1%	-3.1%	-3.0%	-3.5%	-4.2%	-3.0%
玉浦	建物	35.0%	-0.5%	-0.4%	-0.4%	-0.4%	-0.7%	-0.4%
	人的	11.2%	-0.3%	-0.3%	-0.3%	-0.3%	-0.4%	-0.3%
蒲崎	建物	73.1%	-0.4%	-0.5%	-0.4%	+0.2%	+0.7%	-0.4%
	人的	58.3%	-0.8%	-0.9%	-0.7%	+0.4%	+1.5%	-0.8%
寺島	建物	55.8%	-1.2%	-1.1%	-1.1%	-0.7%	-0.3%	-1.2%
	人的	30.8%	-1.7%	-1.6%	-1.6%	-0.9%	-0.1%	-1.7%
西須賀原	建物	35.4%	-0.6%	-0.5%	-0.5%	-0.9%	-1.5%	-0.6%
	人的	11.6%	-0.4%	-0.3%	-0.3%	-0.6%	-1.1%	-0.4%

(a) 最大浸水深の差 (b) 最大流速の差 (c) 津波到達の遅延時間
図-3 海岸林の有無による津波ハザードの差の分布図（海岸林は樹齢50年時を想定している。）

による、浸水深の低減効果は殆ど確認できない。しかしながら、津波到達および流速に関しては、海岸林の効果が認められる。すなわち、前者については、約5秒程度の遅延効果が確認され、後者については、射流条件の高速流れが約1 m/s程度低減していることがわかる。なお、後者については、遡上津波の水位上昇が緩やかになったことが、流速の低下に影響していると考えられる。また、震災当時の平均的な海岸林と、樹齢50年を仮定した海岸林が有する津波減衰効果は同程度である。

図-3に海岸林の有無による最大浸水深、最大流速および津波到達時間の差の分布図を示す。ここで、最大浸水深および最大流速の差は、海岸林を考慮しない場合の値から、考慮する場合の値を差し引いた値である。また、浸水深が0.2 m以上となった時刻を津波到達時間と定義し、海岸林は表-1中の樹齢50年を想定した。

図-3(a)より、海岸林により、林帯背後における複数地点の浸水深を最大1 m程度減衰している。また、図-3(b)より、海岸林の浸水深の低減効果と同様に林帯背後において流速の低減効果が高いことがわかり、その効果は最大で3 m/s程度の低減である。津波到達の遅延時間を示す図-3(c)では、海岸林により仙台東部道路付近で

最大3分程度津波を遅延させ得ることがわかった。ところで、ウェザーニューズ¹⁷⁾の報告によると、生存者と亡くなった方の避難開始までの平均時間はそれぞれ19分と21分であり、その差は2分であった。岩沼市海岸林により期待できる津波遅延効果は最大で3分程度であるが、その僅かな時間が生死に影響を与える可能性がある。

表-3に、図-1の各地区における、建物・人的被害率を示す。被害率は、海岸林の有無や樹齢に応じた浸水深の計算値と、既往研究による建物被害関数¹⁸⁾および人的被害関数¹⁹⁾に基づく推定値である。また、被災前の建物位置や構造種別等のデータは、国土交通省都市局²⁰⁾『復興支援調査アーカイブ』データを使用した。

表-3より、二野倉地区や玉浦地区および西須賀原地区は、樹齢の増加に応じて海岸林による建物・人的被害率は概ね減少し、樹齢50年時の被害率が最小になることが確認できた。特に二野倉地区での被害率の低減効果が最も大きく、樹齢50年時で海岸林を考慮しない場合に対して、人的被害率を4.2%減少させることがわかった。一方で、蒲崎地区や寺島地区は被害率を減少させる樹齢が異なり、矢野目地区では海岸林を考慮しないケースの被害率が最小になることがわかった。すなわち、樹

表-4 防災施設を多段的に付加する想定シナリオ

	想定シナリオ
Case. 1	震災当時
Case. 2	現況の多重防御整備計画（避難丘 15 基、園路）
Case. 3	Case.2+避難丘 50 基（現況の園路上 1 列）
Case. 4	Case.2+避難丘 50 基（現況の園路前方 1 列）
Case. 5	Case.2+園路
Case. 6	Case.2+避難丘 50 基（現況の園路上 1 列）+園路
Case. 7	Case.2+避難丘 50 基（現況の園路前方 1 列）+園路
Case. 8	Case.2+避難丘 100 基（千鳥状 2 列）
Case. 9	Case.2+避難丘 100 基（千鳥状 2 列）+園路

齢や海岸林の空間分布形状によっては、津波が集中しやすい地域が存在し得ることを示唆しており、海岸林の整備の際に注意を要する。

以上のように、被害率の低減効果は矢野目地区を除く全地区では、海岸林により、建物・人的被害率を低減させることを確認できた。また、図-3 のように、海岸林が有するハザード軽減効果は、津波到達時間にこそ、大きく現われる。従って、津波到達時間を考慮することにより、海岸林の防災・減災機能をより適切に評価できると考えられる。

5. 多重防御シナリオ

岩沼市における現況計画の多重防御整備に、多段的に防災施設を付加するシナリオを想定して検討を行なった。防災施設のスケールは、現況計画に基づき設定し、避難丘は上部高さ T.P.+11.0 m の円柱状（直径 80 m）の構造物とし、園路は上部高さ T.P.+3.5m、幅 25 m とする。そして、潮位条件として朔望平均満潮位（T.P.+0.75 m）を与え、津波数値解析を行なった。

表-4 に防災施設の付加に関する想定シナリオを示す。これらのシナリオは、松島湾での島群による津波減衰の事例や、災害危険区域に指定されている空地の有効活用といった考えに基づき想定した。

図-4 に現況の多重防御整備計画である Case. 2 と現況計画に 100 基の避難丘を千鳥状に増設し、それらを増設園路で結ぶことを想定した Case. 9 を示す。

図-5 に最大浸水深と最大流速分布を示す。ここで、Case. 1 と現況計画である Case. 2 の結果を示しており、2011 年東北津波に対して現況の多重防御整備事業の効果が大きいことが確認される。特に、防潮堤と嵩上げ道路や河川堤防などの二線堤による浸水範囲や浸水深の低減効果が大きい。また、岩沼市の防災集団移転先である玉浦地区内の区域が完全に浸水しないこともわかった。さらに、海岸線付近の流速が低減しており、防潮堤による津波減衰効果が大きいことがわかる。

図-6 に、矢野目地区周辺における Case. 1 と Case. 8 の

図-4 多重防御シナリオ（左図：Case. 2 右図：Case. 9）
(Image©TerraMetrics)

図-5 Case. 1 と Case. 2 の最大浸水深分布（上段図）および最大流速分布（下段図）

最大流速分布を示す。震災当時のシナリオでは津波の勢いを保持したまま沿岸域を遡上するのに対し、現況の整備と避難丘の増設により、避難丘 2 列目の背後では、5 m/s 程度流速を低減させることが確認できる。また、標高 11 m の避難丘は完全に浸水せず、緊急避難場所としての機能を果たすことも確認できた。さらに、避難丘背後の海岸林に作用する外力を軽減し、樹木の倒伏を抑制する効果があることもわかった。すなわち、海岸林の流木化による二次被害の事前防止策としての役割も有しているのである。

図-7 に図-1 の Point 2（二野倉地区）における地震発生から 69 分以降における浸水深および流速の時間変化を示す。避難丘や園路といった多段的な防災施設を付加

図-6 避難丘による流速低減効果

図-7 Point 2における想定シナリオに応じた津波浸水深と流速の時間変化

表-5 Case.1と各ケースのハザードの無次元数での比較, Case.2との差分を示している.

	Case.2	Case.3	Case.4	Case.5	Case.6	Case.7	Case.8	Case.9
浸水範囲	0.60	-0.01	-0.01	± 0	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
浸水深	0.45	+0.01	± 0	+0.01	+0.01	+0.01	± 0	+0.01
流速	0.40	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04
流体力	0.29	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04
抗力モーメント	0.47	-0.02	-0.05	-0.04	-0.05	-0.06	-0.06	-0.07
樹木倒伏	0.83	-0.04	-0.09	-0.06	-0.08	-0.12	-0.11	-0.12

することにより、浸水深や流速の低減、津波到達時間の遅延に対して効果的であることがわかる。Case.2とCase.3より、一列に密に避難丘を整備することにより、浸水深の低減への効果は小さいが、流速の低減効果は大きく、1 m/s 程度の低減がみられた。また、Case.3とCase.8より、避難丘を千鳥状に2列に整備することにより、浸水深および流速の低減効果は小さいものの、津波到達時間の遅延効果は大きいことがわかる。特に、Case.9（避難丘100基・園路設定）については、Case.8に園路を増設することにより、現況計画の、震災当時に対する津波到達の遅延効果を倍増させるに至った。二野倉地区は工業地域であり、津波到達時間を遅延させることで、勤務している人々の避難時間の確保に繋がるものと考えられる。

表-5に、現況計画および想定シナリオによる、それぞれ、津波ハザードの空間積分値および津波ハザードの変化量の無次元数を示す。ここで、Case.2～9における津波ハザードの空間積分値をCase.1の空間積分値で除した無次元数であり、Case.3～Case.9に示す値はCase.2との無次元数の差である。

想定シナリオにける種々の防災施設の付加は、浸水深・浸水範囲の低減への寄与は小さいが、流体力やモーメントの低減、樹木倒伏の抑制に対して効果が認められる。すなわち、Case.3とCase.4を比較すると、避難丘については同じ基数でも千年希望の丘施設の前方に整備することで、流体力および樹木に作用する抗力モーメント、樹木倒伏の抑制効果を倍増させることがわかった。また、避難丘と園路を組み合わせたCase.6とCase.7を比較しても同様の傾向がみられ、Case.7については千鳥状の整

備を想定したCase.8と同程度のハザード低減効果を有する。また、Case.5より、園路については、増設することで、津波力・モーメントの低減に一定の効果があり、Case.6, 7および9より、避難丘と組み合わせることで、その効果が増大し得ることを確認できた。

6. おわりに

宮城県岩沼市を対象として、海岸林が有する津波減衰効果や人的・建物被害の軽減効果を、2011年東北津波による被害実績と津波数値解析に基づき評価した。そして、海岸林の浸水深に対する低減効果は小さかったものの、流速の低減および津波到達の遅延効果は相対的に大きく、最大4パーセント程、建物および人的被害率を低減していたことが数値的に示された。

また、現況の多重防御整備事業に多段的に防災施設を付加するシナリオを設定した津波数値解析を行ない、津波減衰に効果的な多重防御のあり方を検討した。

まず、岩沼市で整備中の多重防御施設が、2011年東北津波に対して一定の減衰効果を有することを確認した。そして、垂直避難場所としての避難丘やそれらを結ぶ園路といった防災施設を多段的に整備することは、特に、背後地の流速低減、津波到達時間の遅延および樹木倒伏の抑制に効果的であった。また、避難丘については、防潮堤の背後近くでの整備が有効であった。そして、以上の防災施設を全て組み合わせることにより、現況計画の津波遅延効果を倍増させ得ることがわかった。

こうした防災施設の特性を踏まえると、例えば、十分

な堤防高が確保できない場合、内陸部の住民の避難時間を確保するために、海岸林を増設することは有効である。また、海岸林の前面に避難丘や園路を増設すれば、樹木倒伏を抑制し、海岸林の効果を長時間発揮させるだけでなく、建物被害も軽減させ得る。以上のように、多重防御整備を進める場合、これら防災施設の特性を吟味した整備であることが望ましいと言える。

ところで、防災施設はその規模（費用）に応じてハザード低減効果の大小が影響される。今後は制約条件を考慮したシナリオを想定し、南海トラフ巨大地震などの津波被害想定地域への応用を目指したい。

謝辞：整備事業の基本計画やデータについては、岩沼市建設部 復興・都市整備課 星様からご提供を頂いた。ここに記して謝意を示したい。

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) 今村文彦, 柳澤英明: 海岸植生帯の津波防災への機能・減災か被害拡大か, 自然災害科学 79, 第 25 巻, 第 3 号, pp.264-268, 2006.
- 3) 奥村与志弘, 手代木啓佑, 清野純史: 内陸盛土を利用した津波多重防御に関する一考察, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.916-920, 2014.
- 4) 久保田徹, 仲座栄三, 稲垣賢人, Rusila Savau, Mostafizur Rahman, 入部綱清: 海岸丘と海岸林の複合作用が津波に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, pp.301-305, 2013.
- 5) 山崎宗広, 高橋暁: 松島湾の島嶼部による津波減勢と防潮堤の効果に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, pp.376-380, 2013.
- 6) 岩沼市: 岩沼市震災復興計画 マスタープラン (オンライン), <http://www.city.iwanuma.miyagi.jp/>, 2011
- 7) Satake, K., Fujii, Y., Harada, T. and Namegaya Y.: Time and Space Distribution of Coseismic Slip of the 2011 Tohoku Earthquake as Inferred from Tsunami Waveform Data, Bull. Seismol. Soc. Am., 2013.
- 8) 今村文彦, 越村俊一, 馬淵幸雄, 大家隆行, 岡田清宏: 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル (version1.2) (オンライン), <http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/>, 2012
- 9) 杉野英治, 呉 長江, 是永眞理子, 根本 信, 岩淵洋子: 原子力サイトにおける 2011 東北地震津波の検証, 日本地震工学会論文集, 第 13 巻, 第 2 号, pp.2-21, 2013.
- 10) 原田賢治, 今村文彦: 防潮林による津波減衰効果の評価と減災のための利用の可能性, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.341-345, 2003.
- 11) 原田賢治, 河田恵昭: 津波減衰効果を目的とした海岸林活用条件の検討, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.276-280, 2005.
- 12) 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫: GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.356-360, 1998.
- 13) 今井健太郎, 原田賢治, 渡辺修, 江刺拓司, 島貫直樹, 八木智義, 今村文彦: 実地形における海岸林を利用した津波減勢策-仙台湾岩沼・名取海岸を例として-, 土木学会論文集, Vol.B2-65, pp.326-330, 2009.
- 14) 川口誠史, 甲斐芳郎, 今井健太郎, 原田賢治, 南幸弘, 二宮栄一: 海岸林の倒伏耐力評価式の高度化, 日本建築学会四国支部, 研究報告集, pp.31-32, 2013.
- 15) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ: 現地調査結果 (オンライン), <http://www.coastal.jp/ttjt/>, 2012.
- 16) 相田勇: 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 地震研究所彙報, Vol.52, pp.71-101, 1977.
- 17) ウェザーニューズ: 東日本大震災 津波調査 (調査結果) (オンライン), <http://weathernews.com/>, 2011
- 18) 越村俊一, 郷右近英臣: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波災害における建物脆弱性と津波被害関数, 土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, pp.36-340, 2012.
- 19) 越村俊一, 行谷祐一, 柳澤英明: 津波被害関数の構築, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, pp.320-331, 2009.
- 20) 国土交通省都市局: 『復興支援調査アーカイブ』 (オンライン), <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>, 2012.

(2016.3.16 受付)

TSUNAMI DAMAGE MITIGATION EFFECT BY MULTIPLE DEFENSE SYSTEM USING COASTAL FOREST IN IWANUMA CITY

Hiroyuki OHIRA, Akihiro HAYASHI, Kei YAMASHITA and Fumihiko IMAMURA

We estimated tsunami mitigation effects of coastal forest, multiple countermeasures, and its combination by tsunami numerical analysis and actual damage data in Iwanuma City. Our results demonstrated that coastal forest could delay the tsunami arrival time at around the Sendai-Tobu Road by a maximum of three minutes. Reduction of building damage probability and fatality ratio in all areas other than Yanome District can be confirmed. Furthermore, scenarios focused on a multiple defense system were also considered in our hazard assessment. As results, the current multiple defense system shows tsunami mitigation effect. Configurations and combinations of the multiple defense system could increase the mitigation effect. Tide embankment decreases inundation of tsunami, and hill decreases flow velocity of the rear. Multiple defense system utilizing these characteristics with the combination is effective for tsunami mitigation.