

# 植生帯・丘・護岸による 複合的津波減勢効果に関する研究

稲垣 賢人<sup>1</sup>・仲座 栄三<sup>2</sup>・田中 聡<sup>3</sup>・SCHAAB Carolyn<sup>4</sup>

<sup>1</sup>琉球大学理工学研究科博士後期課程 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地)

E-mail: k148656@u-ryukyu.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地)

E-mail: enakaza@tec.u-ryukyu.co.jp

<sup>3</sup>正会員 株式会社エコー 技術本部防災解析部 (〒110-0014 東京都台東区北野2-6-4 上野竹内ビル)

E-mail: s-tanaka@ecoh.co.jp

<sup>4</sup>琉球大学理工学研究科博士後期課程 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地)

E-mail: cschaab@hawaii.edu

東北地方太平洋沖地震によって発生した大津波によって甚大な災害を受けた東北地方では、沿岸部の丘が果たした役割に着目し、沿岸部の低地に「緑の丘」を築くプロジェクトが復興シンボルとして進められている。本研究においては、津波対策工として、植生帯、丘、護岸が単独で設置された場合の減勢効果を比較した上で、丘と植生帯、あるいは丘と護岸とを同時に設置した場合の減勢効果を示し、さらにそれらが一体的に設置された場合の複合効果について実験的に調べている。複合的効果は、無対策の場合と比較して、対策工の背後域における浸水深、流速、比エネルギーを下げ、さらに津波到達時間を遅らせることが示されている。最後に背後域における輸送水量が調べられ、複合的対策工の有効性が示されている。

**Key Words :** tsunami, dune, seawall, wind-break forest, mitigation, inundation depth

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した大津波によって甚大な災害を受けた東北地方では、一定程度の高さを有する丘が避難時に果たした役割、さらには津波の来襲を止めたことの役割などに着目し、沿岸部の低地に緑の丘『千年希望の丘』を築くプロジェクトが復興のシンボルとして進められている<sup>1)</sup>。

沿岸部における津波防災対策としては、護岸や丘の果たす役割に加えて、松林など植生帯の果たす役割も期待されてきた<sup>2)3)4)</sup>。しかしながら、東北地方の津波災害は、それらの防災対策が巨大津波に対しては必ずしも有効に働かないことを教訓として残した。

特に、植生帯の果たす津波減勢効果については、巨大津波がほとんどの防潮林をなぎ倒し、内陸奥深くまでも侵入したことからその役割を根本的に見直さざるを得なくなった<sup>5)</sup>。

これに対して、震災後に行われた詳細な現地調査などからは、わずかに残された防潮林の背後域に家屋の倒壊等の軽減が認められることなどが報告されるに及び、巨

大津波に対する防潮林の保護対策が適切に取られるのであれば、防潮林の果たす役割についても期待を示唆する研究もある<sup>6)</sup>。

一方、護岸や丘については、巨大津波を完全には止めることができなかつたとしても、その背後の浸水域における家屋等の被害状況から、津波減勢効果が明らかに存在したことが報告されている<sup>7)8)</sup>。また、丘については、先に述べたように、津波避難に対して果たした役割は大きく、『命を守る丘』としての避難場所機能も期待されている<sup>1)</sup>。

本研究においては、巨大津波に対して沿岸部に存在した丘の果たした津波減勢効果に着目し、丘と植生帯による津波減勢効果、植生帯への作用力軽減と多重防御を期待した植生帯・丘・護岸の組み合わせによる複合的津波減勢効果を実験的に調べることを主目的としている。

## 2. 実験装置および実験方法

実験には、長さ10 m、幅0.6 mの開水路を使用した。その一端には、図-1に示すように貯留タンク (長さ1.5 m、



持つ津波減勢効果を調べるために、caseB～caseDを設定した。また、caseE, caseFは、それぞれ丘と植生帯、丘と護岸の組み合わせに対する複合効果を調べることを目的としている。最後に、丘及び植生帯、そして護岸を組み合わせた場合がcaseGであるが、丘の表法先と護岸との距離を0 cm, 50 cm, 100 cmに設定した場合をそれぞれcaseG1, caseG2, caseG3とした。

図-1に示すように、津波伝播の測定には14台の容量式波高計(Ch.1～14, KENEK社製)及び2台の超小型プロペラ流速計(V1及びV2, 中村製作所)及びデジタルカメラを使用した。プロペラ流速計は、開水路の床面上約5 mmの位置に設定された。後に説明を行うcaseG3の場合、護岸設置位置がちょうどCh.1の位置に当たるため、護岸への入射津波高を計測する目的から、この場合に限り、Ch.1の位置をその他のケースの位置より20 cm沖側に設置した。図-1において、Ch.1～14の番号の下の数値は測定位置間の距離を表す。

用いた容量式波高計は、浸水深約1 cm以上において水位の検出が可能となっている。したがって、津波のフロント付近及び低減期においては、1 cm以下の浸水深が生じるため、計測が不可となる。浸水深が約1 cmを越えた時点からは、波高計の水位計測の精度は高く、かつ直線的なキャリブレーションを確認している。

津波高(あるいは浸水深)及び流速の測定は、それぞれの実験ケースに対して3回行った。実験値の整理においては、これら3回の実験結果の平均値を用いている。

開水路の上流端の貯留タンクの水深と入射津波測定位置(Ch.1)で測定された津波高(以下、これを入射津波高と呼ぶ)の関係は、貯留水深10, 15, 18, 20, 25, 28, 30 cmに対し、それぞれ入射津波高2.5, 3.5, 4.0, 4.3, 5.3, 5.7, 6.0 cmとなった(Ch.1で測定)。

### 3. 実験結果および考察

実験データの整理及び議論においては、対策工のない水平床上を津波が伝播する場合の浸水深や流速を基準として、対策工を施した場合のそれらと比較することにより、それぞれの対策工の持つ津波減勢効果を明らかにする。以下、順に単独工法、複合的工法の場合について議論を行う。

#### (1) 植生帯、丘、護岸が単独で設置される場合の津波減勢効果

植生帯の持つ津波減勢効果、護岸や丘による津波減勢効果に関しては、これまでも多くの研究事例が存在する<sup>2)~4), 9)~10)</sup>。しかしながら、本研究ではそれらを複合的に作用させた場合の効果を測るための基準として、植生帯、丘、護岸がそれぞれ単独で設置された場合の津波減

勢効果を系統的に比較検討する。

図-2(a)～(c)に、水平床の場合(caseA)に対して、Ch.1及びV1位置で得られた浸水深、流速、フルード数の経時変化を示す(入射津波高:  $H_i = 4.3$  cm)。図示のとおり、津波のフロントで流速値は200 cm/sに達しており、瞬時の浸水深及び流速を用いて算出したフルード数はピーク値で3.5を超えている。用いたプロペラ流速計の計測可能流速が最大200 cm/sとなっているため、入射津波高が4.3 cm以上となった実験に対しては、流速の時間波形はそのピーク付近で欠測となった。また、津波が到達する以前の時間帯の浸水深が、一定値(1.0 cm程度)を示しているのは、実験方法で説明したように、用いた容量式波高計に計測可能な下限値(浸水深約1 cm)があることによる。本来この計測可能前の値は、プロットすべきでないかと判断されるが、計測可能となった浸水深の開始時を分かりやすくするために表示してある。

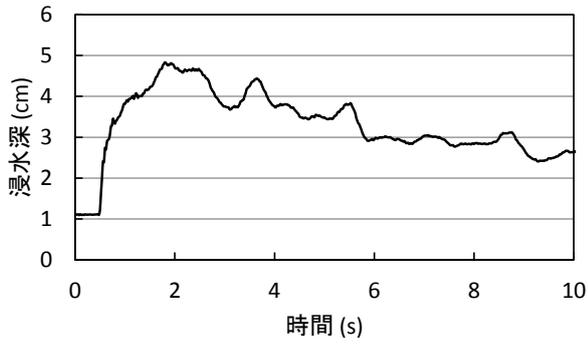
図-3に、植生帯フロント前面及び丘の表法先となる位置(Ch.5の位置)における最大浸水と入射津波高の関係を示す。図には、水平床の場合(caseA)、植生帯単独(caseB)、丘単独(caseC)、護岸単独(caseD)について比較を行っている。また、図の実線は、それぞれのケースに対するデータの直線近似を表す。

図示のとおり、水平床の場合には、最大浸水深と入射津波高はほぼ1対1の関係(実線)に沿っている。対して、その他のケースにおいては、最大浸水深は入射津波高を大きく上回っている。これは、植生帯や丘、あるいは護岸による反射波の影響による(反射波の発生の詳細については、図-16で述べる)。

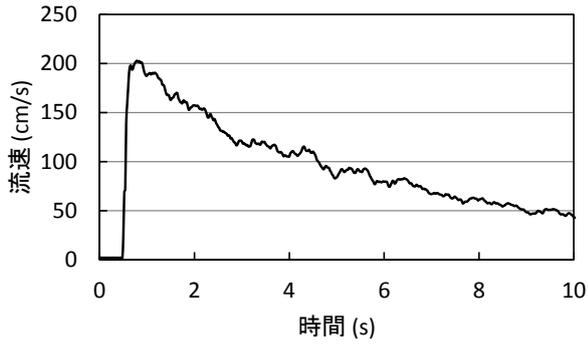
2011年の東北地方大津波災害の後に行われた津波高や浸水深の総合的調査結果<sup>17)</sup>によれば、宮城県名取市沿岸では浸水深が2.1～8.5 mであったことが報告されている。津波痕跡は必ずしも入射津波高に一致しないことが分かっている<sup>18)</sup>。本実験は、入射津波高が実スケールで3～6 m程度となるように行われているが、図-3に示す結果を参考にすると、浸水深の痕跡として最大6～15 m程度を沿岸部に残すような入射津波を対象としていると説明することもできる。

植生帯、丘、護岸のそれぞれが単独で有する津波減勢効果を比較するために、津波がそれぞれの対策工の設置域を通過した後となるCh.14の位置で得られた浸水深の経時変化の比較を図-4に示す。この図は、入射津波高が4.3 cmの場合に当たる。これは、後に比較する流速値が全測定時間に亘って得られている場合の最大の入射津波高に対応する。そのため、ここではこの入射津波高のケースを代表例として示すことにした。

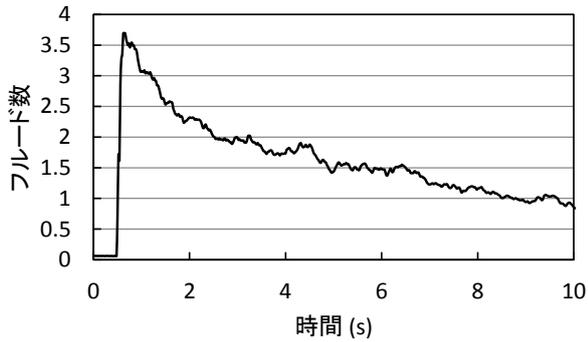
得られた浸水深は、各ケースでそれぞれ波形の立ち上がり時間(津波到達時間)が異なる。比較のために、ここでは津波の到達時間を水平床の場合に一致するように、



(a) 浸水深の経時変化



(b) 流速の経時変化



(c) フルード数の経時変化

図-2 浸水深、流速及びフルード数の経時変化 (水平床,  $H_i=4.3\text{cm}$ )

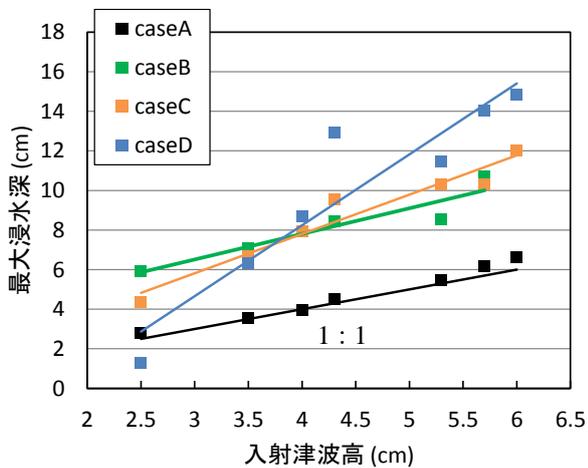


図-3 Ch.5位置における最大浸水深と入射津波高の関係

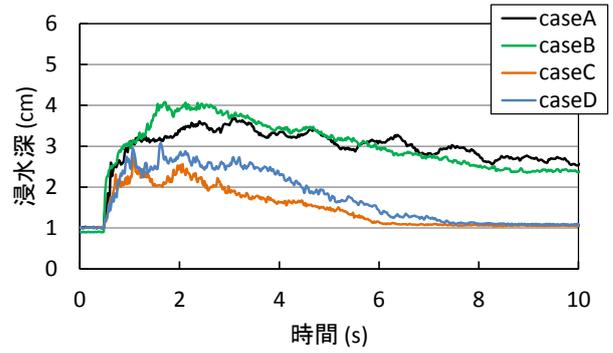


図-4 通過津波に伴う浸水深の経時変化 (Ch.14,  $H_i=4.3\text{cm}$ )

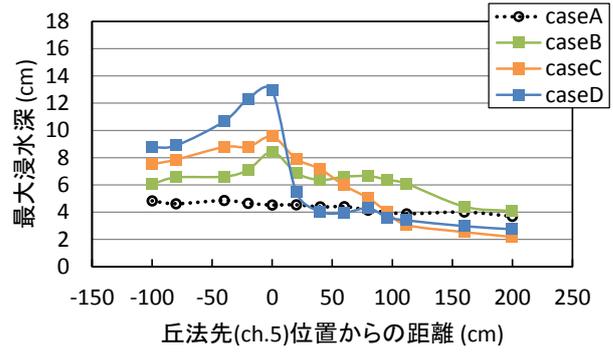


図-5 最大浸水深の分布 ( $H_i=4.3\text{cm}$ )

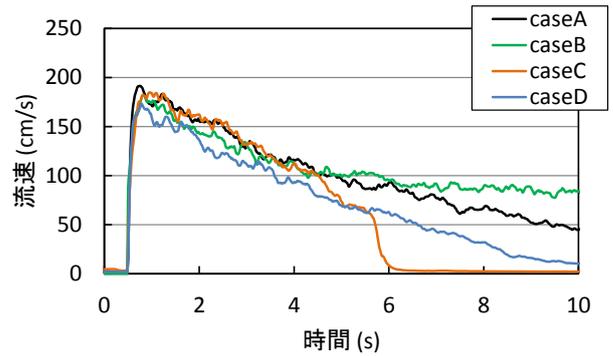


図-6 流速の経時変化 ( $V_2$ ,  $H_i=4.3\text{cm}$ )

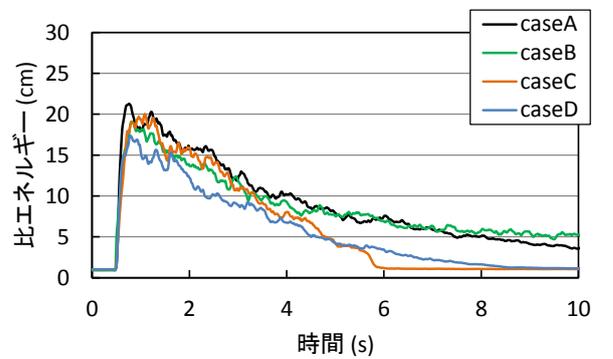


図-7 比エネルギーの経時変化 (Ch.14 and  $V_2$ ,  $H_i=4.3\text{cm}$ )

時間波形に時間のオフセットを施してある(各ケースにおける津波到達時間の違いについては、後に図-10で説明を行う)。また、津波が到達する以前の時間帯の浸水深が、何れのケースにおいても一定値 1.0 cm 程度を示していること、さらに caseC と caseD について津波減衰期となる 6s 以降や 8s 以降については、先に述べた容量式波高計の水位計測の下限値(約 1 cm)の存在を表すことに注意を要する。以下、浸水深の図においては、同様な取り扱いとする。

浸水深に対する減勢効果は、それぞれのケースを水平床の場合(caseA)と比較することで得られる。図示のとおり、丘(caseC)及び護岸(caseD)のケースは、浸水深を低下させている。植生帯の場合(caseB)は、水平床の場合よりも最大浸水深を高め、津波の全継続時間に亘って比較すると、水平床の場合と同程度となっている。

図-5に、植生帯前面位置及び丘の法先(Ch.5の位置)を  $x$  軸の始点として、Ch.1~Ch.14 までの間の最大浸水深の分布を示す(入射津波高: 4.3 cm)。図中データを結ぶ実線は、各ケースでデータの変化が分かり易いように、データ間をスプライン関数を用いて結んだものを表す。

植生帯のケース(caseB)の場合、植生帯フロント前面及び丘の法先( $x=0.0$  cm)で最大浸水深のピークを取り、植生帯内では入射津波高よりも高い状態でほぼ一様(6.3 cm 程度)となっている。このように植生帯内で浸水深が高まるのは、樹木の及ぼす流体抵抗による植生帯内貯留効果と判断される。浸水深は、植生帯の後端( $x=108.0$  cm)より岸側で急激に低下している。植生帯フロントよりも沖側では、植生帯からの反射波の影響で、入射津波高(4.3 cm)よりも高くなっている。

丘単独設置(caseC)の場合、反射波の発生によって、最大浸水深は丘法先( $x=0.0$  cm)にピークを生じており、丘の上では後端に行くにつれて直線的に減少している。

護岸単独設置(caseD)の場合にも反射波の発生によって護岸設置位置となる  $x=0.0$  cm で最大浸水深のピークが生じている。最大浸水深の護岸による低減は、護岸の直背後より現れている。

図-6に、V2位置(すなわち、対策工通過後の Ch.14位置)で得られた流速の経時変化の比較を示す(図-4に示す浸水深の計測と同時測定)。護岸(caseD)の場合、流速のピーク値を含め、全体的に流速を減勢させている。丘の場合(caseC)は、最大流速時から2秒間ほどは(すなわち、入射津波の水位が下がり始め、丘の上で反射津波が形成されるまでの間は)水平床の場合の流速変動とほぼ同じとなっており、減勢効果がほとんど認められない。植生帯の場合(caseB)、水平床の場合の流速値を若干下回っており、減勢効果が認められる。し

かしながら、後半部においては(約 4 s 以降においては)、逆に水平床の場合よりも流速が増えている。これは、流速が比較的早い時間帯に、植生の抵抗で植生帯内に貯留される形にあった水量が流速の弱まる津波波形の後半部に流れ出たためと判断される。

図-7に、V2位置(Ch.14位置)で計測された比エネルギーの時間波形の比較を示す。比エネルギー  $E$  は計測地点の浸水深  $h$ 、流速  $v$  を用いて、次のように与えられた。

$$E = \frac{v^2}{2g} + h \quad (1)$$

3次元的な構造物に作用する津波の最大水平波力は、比エネルギーに比例することが知られている<sup>19)</sup>。したがって、対策工による津波減勢効果として比エネルギーを検討しておくことは重要といえる。

比エネルギーの算定式(1)から明らかのように、比エネルギーは流速の二乗の項を含むため、流速が比較的大きな時間帯では、速度の影響を強く受ける。図-7に示すように、比エネルギーの経時変化は、流速が比較的大きな時間帯(0.5 s~4.0 s)にかけては、流速の経時変化の影響を強く受けたものとなっている。最大のピーク値で比較すると、護岸(caseD)の場合に 25.6% 程度の減勢効果を示し、最も高い効果を示している。護岸に次いで、減勢効果は植生帯(caseB)、丘(caseE)の順に高くなっている。図-6及び7において、丘の場合に、時間 6 s 付近で流速及び比エネルギーの値が激減している。これは、入射津波の水位が下がり、津波が丘を越えられなくなったことによるものである。護岸設置の場合、津波フロント付近に見られる比エネルギーの低減効果は、その背後に植生帯を設置する場合においては、植生帯に対する緩衝作用として働く可能性を示すものと言える。

津波が到達する以前の時間帯の比エネルギーが、何れのケースにおいても一定値を示していること、さらに caseC と caseD について津波減衰期となる 6s 以降や 8s 以降については、先に述べた容量式波高計の水位計測の下限値(約 1 cm)の存在のために、本来はデータのプロットは意味をなさない。しかし、水位計測可能となった時点の把握が可能なように、浸水深約 1.0 cm に対応する一定値が示されていることに注意を要する。以下、比エネルギー図については、同様な取り扱いとする。

## (2) 植生帯、丘、護岸の組み合わせによる津波減勢効果の検討

植生帯と丘の組み合わせによる津波減勢効果に関する研究としては、丘を有する現地地形に植生帯を設置した場合を取り扱った研究など数多く存在する<sup>8),9),13)~16)</sup>。また、護岸と丘を組み合わせた研究例も少なくない。しかしながら、植生帯、丘、そして護岸を一体的に作用させ

た場合の効果を検討する上においては、それらの効果をここで系統的に比較しておく必要がある。

以下においては、植生帯と丘の組み合わせ (caseE)、丘と護岸の組み合わせ (caseF)、植生帯と丘及び護岸の組み合わせ (caseG1、丘表法先端と護岸との距離: 0 m) に関して津波減勢効果を比較する。

対策工通過後の津波の浸水深 (Ch.14 位置) の比較について図-8 に示す。図には、比較のための基準として水平床 (caseA) の場合の浸水深をも表示してある。図示のとおり、対策工通過後の最大浸水深のピーク値は caseE~G1 共に水平床の場合と比較すると 28.7%~46.3% の減勢効果となっている。津波フロントから 3.5s までの間では、植生帯と丘、そして護岸を一体的に設置した場合 (caseG1) が最も効果が現れているものの、後の時間帯では caseF の場合よりも若干高くなっている。これは丘の上で反射した津波が護岸で再反射され再び丘を越えて伝播することによる。

図-9 に、流速の比較を示す。丘と護岸の組み合わせとなる caseF については、0.5~約 3.0s の間、水平床の場合の流速値とほぼ同じとなっており、丘の上で反射波の形成が見られる時間 (約 3.0 s) の後に流速の急激な低減が認められる。図-6 に示す丘のみのケース (caseC) の流速分布と同様な流速の経時変化となっているものの、流速の急激な低減が認められる時間が 4.0 s 過ぎから 3.0 s 前へと早まっている点に違いが見られる。

丘に植生帯を配置したケース (caseE) の場合、全時間に亘って流速値の低減が認められる。丘と植生帯に加えて護岸を設置したケース (caseG1) の場合、さらに流速の低減効果が認められる。時間 4.0 s 付近に認められる流速の増大は、丘からの反射津波が護岸に再反射して丘を越えることによるものである。その際の流速のピーク値は津波フロント付近の最大流速を越えていない。反射波の挙動については、図-16 にて説明される。

図-10 に、比エネルギーの比較を示す。流速値では低減効果があり認められない caseF についても、全時間に亘って低減効果が認められる。津波の減勢効果としては、丘と護岸、丘と植生帯、丘と植生帯に護岸を加えたケースの順に高くなっている。

図-11 に、最大浸水深の岸沖方向分布の比較を示す。図中データを結ぶ実線は、各ケースでデータの変化が分かり易いように、データ間をスプライン関数を用いて結んだものを表す。対策工の前面領域 ( $x < 0.0$  cm) においては、最大浸水深が単独設置の場合 (図-5 に示す) よりも高まっている。通過領域 ( $x > 120.0$  cm) においては、複合的設置の効果が認められるものの、単独設置の場合と比較し、その差はさほど大きくない。しかしながら、図-4 及び図-8 の比較から明らかなように、津波の継続時間に亘って浸水深の経時変化を比較すると、複合的設

置の効果は大きい。

図-12 に、対策工通過後の領域 (Ch.14) における最大浸水深と入射津波高の関係の比較を示す。図中の実線及び破線は、各ケース毎にデータ分布を 2 次曲線近似で表したものである。植生帯のみを設置する場合 (caseB)、植生の抵抗が流速を低減させることから逆に浸水深が高まり、水平床の場合よりも高めに推移している。護岸の場合 (caseD) は、入射津波高が護岸高よりも低い場合に低減効果を示し、入射津波高が護岸高を上回る場合には水平床のケースよりも高くなっている。丘の場合 (caseC)、一貫して低減効果を示している。丘に植生帯あるいは護岸を加えたケース (caseE, caseF) については、若干低減効果が増すものの、6 cm の入射津波高に対しては、丘のみの場合とほぼ同程度となっている。丘に植生帯を加え、さらに護岸をも追加したケース (caseG1) の場合、丘のみのケースよりも一貫して浸水深を低減させている。

丘の高さを来襲津波高よりも十分に大きくとれば津波の通過を阻止することは原理上可能となる。しかしながら、一般に丘の高さをいくらかでも高められるという状況は想定できない。丘の前面に護岸を備え、さらに植生帯を丘の上に配置することで、背の高い対策工に匹敵する津波減勢効果が得られる可能性のあることが示唆される。

### (3) 護岸設置位置の検討

護岸と植生帯フロントとの距離を適切にとることで植生帯内の樹木等に及ぼす流体力が低減できることが指摘されている<sup>20, 21)</sup>。本研究では、流速の測定位置が津波の入射側となる V1 位置と対策工通過後の V2 位置に固定されたため、護岸設置位置が植生帯内の樹木に作用する流体力に及ぼす影響を直接的に検討することはできていない。ここでは、対策工通過後の津波の減勢に丘と護岸との距離が与える影響について検討する。

図-13~15 に、丘の法先と護岸との距離を 0 cm, 50 cm, 100 cm と変化させた場合の浸水深、流速、比エネルギーの比較を示す。これらの経時変化については、護岸設置位置による違いはほとんど表れていない。caseG1 の場合に、時間 4.0 s 前後で浸水深、流速、比エネルギーの再増加が認められる。これは、丘で発生した反射津波が護岸で再び反射されそれが丘を越えて通過したことによる。こうした再反射波の通過は、caseG2 及び caseG3 では抑えられている。

### (4) 入射津波の伝播と反射波の形成

図-16 に、各ケースに対する入射津波の伝播形態を示す。図では津波の入射に焦点を当てていることから各観測点 (Ch.1~9) で得られた浸水深の時間波形を示してあるが、その波形には Ch.1 から測定点までの距離に

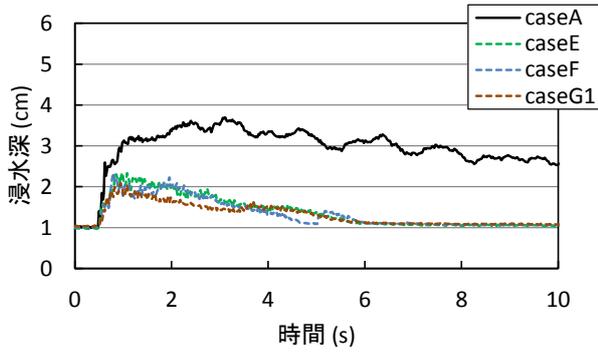


図-8 浸水深の経時変化

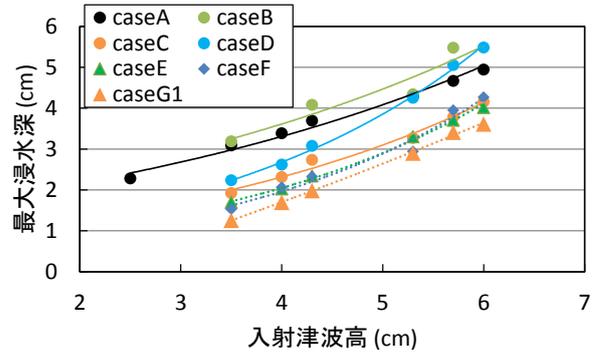


図-12 通過領域における最大浸水深と入射津波高の関係

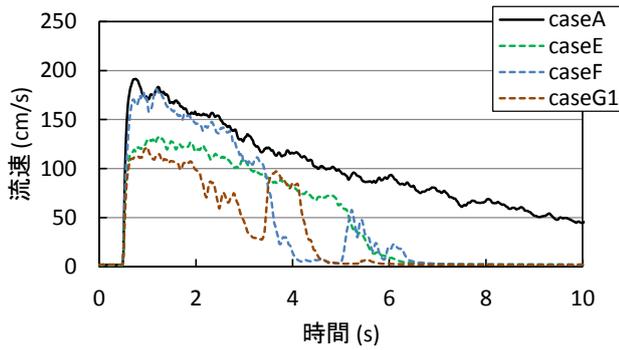


図-9 流速の経時変化

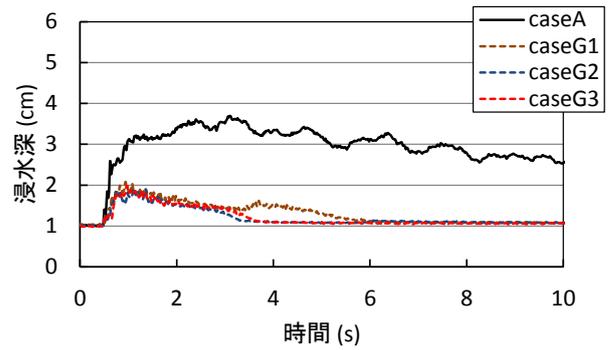


図-13 浸水深の経時変化 (護岸設置位置の効果の比較)

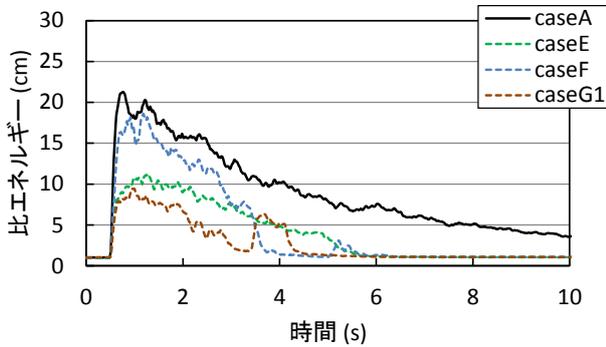


図-10 比エネルギーの経時変化

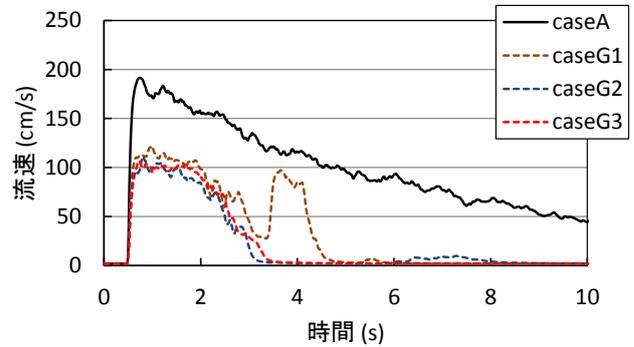


図-14 流速の経時変化 (護岸設置位置の効果の比較)

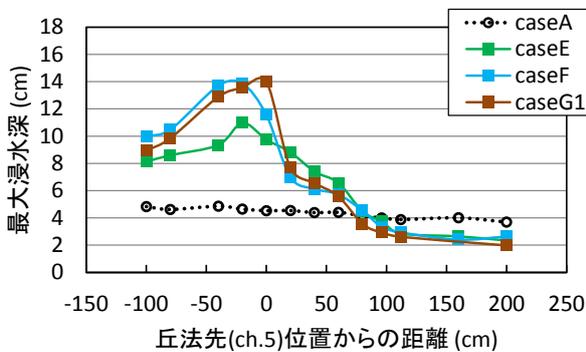


図-11 最大浸水深の比較

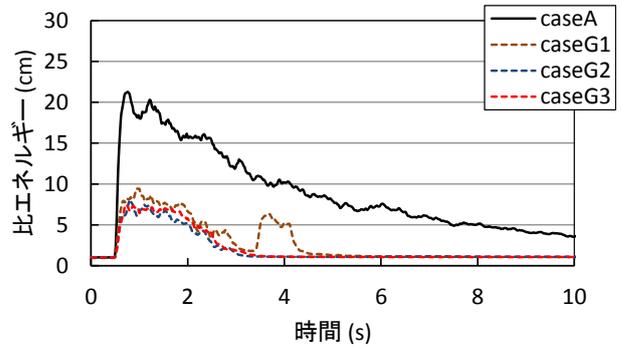


図-15 比エネルギーの経時変化 (護岸設置位置の効果の比較)

応じて縦軸方向にオフセットをかけてある。したがって、各波形の初期時間に見られる直線部が津波到達前のゼロ浸水深を表す。

対策工のない場合 (caseA) の津波伝播は、開水路水平床上を様な伝播速度で伝播している。図に示す破線は、津波フロントの同位相線を表す。この時の津波フロントの伝播速度は、 $c=163.678\text{ cm/s}$  となっている。

これに対し、caseB (植生帯設置) の場合、津波フロントは植生帯 (Ch.5 ~ 11) を通過後に、水平床上の津波伝播速度よりも遅れる傾向にある。また、植生帯内で反射波の発生が認められ、それが沖側へ波高減衰を見せながら伝播している。

caseC (丘) の場合、津波フロントは丘 (Ch.5~11) を通過した後も、ほぼ水平上の津波伝播と同じ速度で伝播している。Ch.5 付近 (すなわち、丘の法面上) で反射波が発生し、それが沖側へ伝播している。また、反射波の発生は植生帯設置 (caseB) の場合よりも早い。

caseD (護岸) の場合、護岸に激しく衝突した津波は、これまでの中でも最も大きな反射波が発生、Ch.4 から Ch.1 へかけて反射波伝播が認められる。この場合、わずかではあるが護岸通過後の津波の伝播は破線に示す水平床上の伝播速度よりも遅れている。

植生帯と丘を組み合わせた場合 (caseE) は、丘のみのケース (caseC) と比較し、対策工を通過後の伝播速度に遅れが見られると共に、反射波の発生が早まり、その高さも大きくなっている。対して、丘と護岸の場合 (caseF) には通過後の津波にさらに遅れが見られ、反射波の高さも大きくなっている。この場合、丘で生じた反射津波は護岸で再反射され再度丘を通過している。

植生帯、丘、護岸の3つの対策工を組み合わせたケース (caseG1, caseG2, caseG3) は、それぞれ護岸と植生帯の距離を 0 m, 50 m, 100 m と変化させた場合に当たる。caseG1 の場合は、入射津波は護岸で反射されると共に、護岸を乗り越え、さらに丘を越えて伝播している。丘からは反射波が生じ、護岸位置で再反射され再び丘を通過しているが、その規模は小さい。

写真-1 に、caseG1 の場合における入射津波の護岸越流と丘上での反射津波の形成、反射津波の護岸による再反射の様子を示す。来襲津波は護岸を乗り越え、激しく植生帯フロント部に衝突している。また、丘の上で形成された反射津波が護岸位置に戻り再反射される様子が示されている。

##### (5) 津波到達時間の遅延効果の検討

図-17 に、津波到達時間に対する遅延効果の比較を示す。ここで述べる到達時間とは、津波が測定位置 Ch.1 から Ch.14 までの間を伝播するのに要した時間を意味する。その上で、津波到達時間の遅延効果とは、対策工を

施した場合の津波到達時間から caseA の津波到達時間を差し引いた時間の大きさをもって表す。図の横軸は Ch.1 の位置で得られた入射津波高を表す。

図中の実線及び破線は、各ケース毎にデータ分布を2次曲線近似で表したものである。その内で、実線は対策工が単独で設置された場合に対応し、破線は複合的対策工とした場合に対応する。

植生帯単独設置の場合 (caseB) は、入射津波高の増加と共に、遅延効果が高まっている。その傾向は他の対策工の傾向と異っている。これは、入射津波高が増すにつれて流速が増し、その結果として植生による流体抵抗が高まることによるものと判断される。

丘単独設置の場合 (caseC) の遅延効果は、入射津波高が増すにつれて、指数関数的に減少している。護岸単独設置の場合 (caseD) も、遅延効果は入射津波高が増すにつれて減少するが、その割合は直線的であり、最大の入射津波高 ( $H_i = 6\text{ cm}$ ) に対しては caseE と同程度となっている。

丘と植生帯 (caseE)、丘と護岸 (caseF) のケースについては、低い入射津波高に関して、それらの複合的効果が働くものの、入射津波高が高くなるにつれて、その効果が急激に減少し、最大の入射津波高に対しては、護岸単独設置の場合と同程度にまでも低下している。丘と植生帯、そして護岸を一体的に作用させた場合 (caseG1) の遅延効果は格段に上昇し、丘に護岸や植生帯を組み合わせた場合 (caseE, caseF) の効果の2倍程度となっている。

##### (6) 津波による輸送水量の比較

図-18に、対策工を通過した波が対策工背後域にもたらせた輸送水量の比較を示す。輸送水量は、開水路終端に設置した水槽に溜まった水量をもって測った。図において、対策工を単独で設置した場合については、2次曲線による近似を実線で表し、複合的対策工については破線で表してある。図に示すように、対策工を設置しない場合 (caseA) の輸送水量は、対策工ありの場合に比較して大きくなっている。対策工として植生帯を設置した場合 (caseB) には、17%~32%ほど輸送水量の減少が見られる。対策工として丘や護岸を単独で設置した場合 (caseCあるいはcaseD)、それらの高さによる津波の反射や遮断が存在するため、輸送水量の低下が大きく現れている。入射津波高  $H_i = 6.0\text{ cm}$  で比較すると、丘や護岸を単独で設置する場合には、対策工無しの場合の輸送水量の半分程度となっている。丘と護岸の組み合わせ、あるいは丘と植生帯の組み合わせによる効果はほとんど同じであり、それらが単独で設置される場合に比較して輸送水量の低減効果の増大はさほど大きくない。丘及び植生帯、さらに護岸を一体的に作用させた対策工の場合

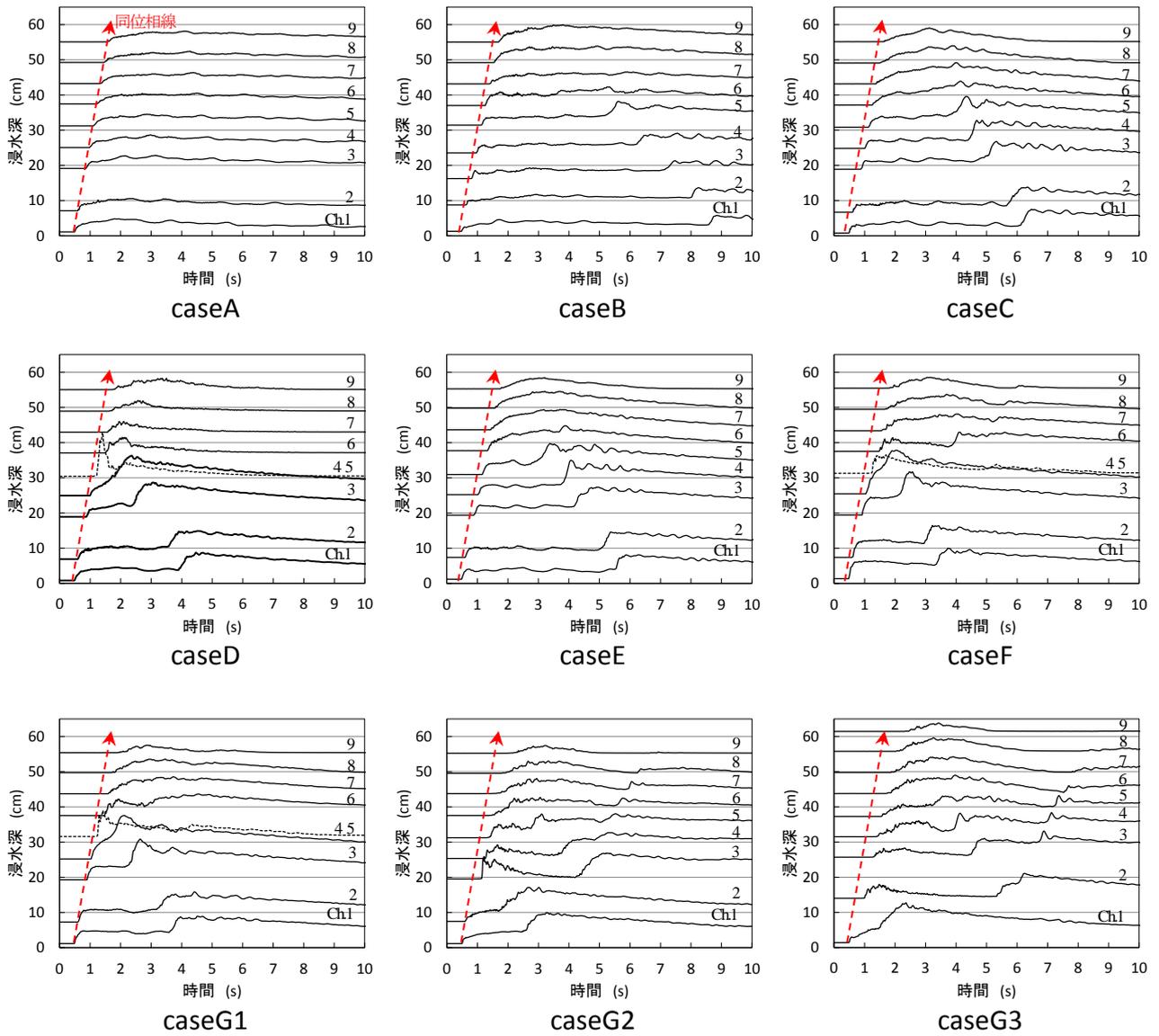


図-16 入射津波の伝播と反射波の形成

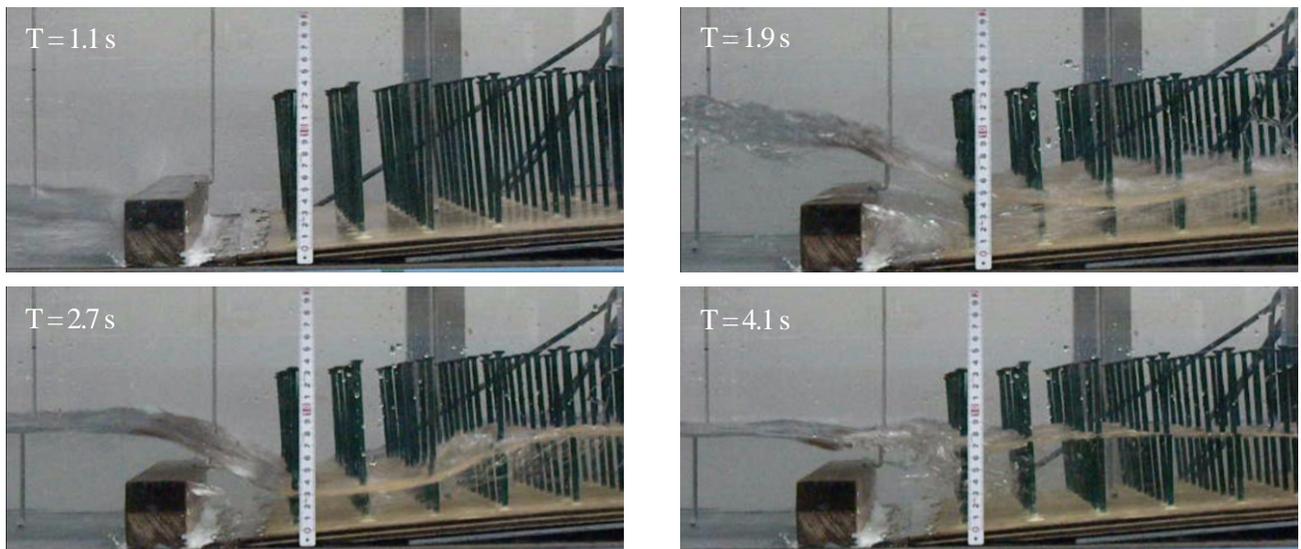


写真-1 津波の護岸越流及び丘の上における反射波の形成 (caseG1)

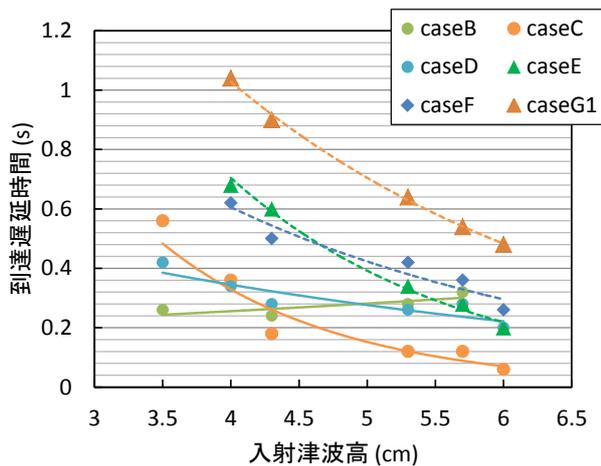


図-17 津波到達時間に対する遅延効果の比較

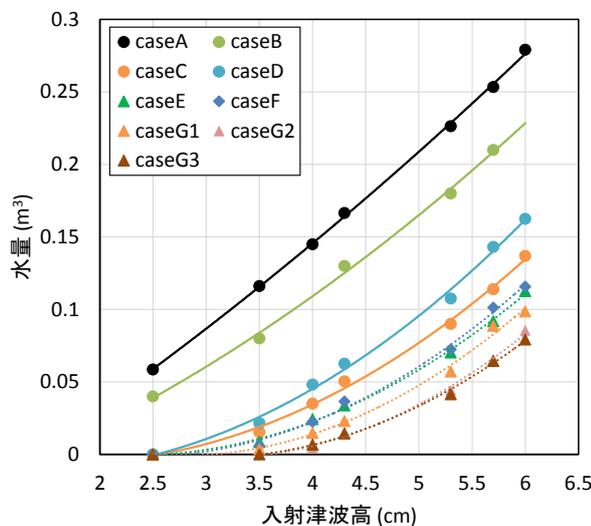


図-18 津波による輸送水量の比較

(caseG1)は、輸送水量をさらに低下させている。しかし、caseEやcaseFからの効果の増大は大きくない。caseG1, caseG2, caseG3をそれぞれ比較すると、caseG2とcaseG3の場合が同程度であり、最も効果が高い。これは、護岸と丘との距離を離すことで、その間に貯留される水量が高まることによる。

#### 4. おわりに

津波対策工として植生帯、丘、そして護岸を設置する場合を想定し、それらが単独で設置される場合についての津波減勢効果の特性を把握した上で、それらが複合的に設置された場合の津波減勢効果を実験的に調べた。その結果、以下に示す主な結論を得た。

1) 植生帯の単独設置は、護岸や丘を設置する場合と比較すると津波の通過率が高く、浸水深に対する減衰効果は低い。しかし、入射津波高が高まるにつれ津波到達時

間を遅らせる効果は若干ではあるが直線的に高まる傾向にある。通過波の輸送水量への低減効果は、対策工無しの場合の輸送水量の17~32%ほどである。

2) 丘の単独設置は、浸水深に対する低減効果を持つが、津波フロント部の流速及び比エネルギーに対しては減勢効果が低い。津波の輸送水量に対しては低減効果を有する。津波の到達時間を遅らせる効果は、入射津波高が増すにつれて指数曲線的に低下する。通過波の輸送水量は、対策工無しの場合の輸送水量の半分ほどに低下した。

3) 護岸の単独設置は、丘の単独設置と比較して、流速の低減に寄与し、津波の到達時間の遅延効果が高い。しかし、他の工法と比較して、高い反射津波を形成するため、その影響に注意を要する。

4) 護岸の設置は、通過津波フロント付近に見られる比エネルギーのピーク値を下げており、その背後に植生帯などを設置する場合、それへの緩衝作用を有する。

5) 丘と植生帯、丘と護岸の組み合わせによる対策工の場合、浸水深及び流速、比エネルギーに対する減勢効果を単独対策工よりも高めることができる。通過波の輸送水量に対する効果は、単独設置の場合の効果に対してそれほど増加を見せなかった。

6) 丘と植生帯、そして護岸を複合的に組み合わせることで、さらに減勢効果を高めることができる。比エネルギーに関しては、無対策の場合に比較して半分以下に低減する。輸送水量に関しては、護岸と丘の距離を離すことで効果が高まる。これは、護岸と丘の間に貯留される水量が高まることによる。

7) 丘及び護岸、そして植生帯の設置は、それら対策工の前面に(沖側に)反射津波を形成させるため、その影響に注意を要する。

**謝辞:** 本研究の一部には、琉球大学島嶼防災研究センターのプロジェクト研究経費の支援を受けている。また、尾崎次郎奨学基金の援助を受けた。実験の遂行に当たっては、琉球大学工学部環境建設工学科の入部綱清助教を始め、卒業研究に従事した当時4年次学生のご協力を得た。ここに記し、感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 宮城県岩沼市：岩沼市震災復興計画グランドデザイン～愛と希望の復興～, pp. 17-44, 2011.
- 2) 首藤伸夫：防潮林の津波に対する効果と限界：第32回海岸工学講演論文集, pp. 465-469, 1985.
- 3) 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.
- 4) 飯村耕介, 田中則夫, 原田賢治, 谷本勝利：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), Vol. 66, No. 1, pp. 281-285, 2010.

- 5) 稲垣賢人, 仲座栄三, 入部綱清, 渡辺康志: 東北地方大津波によって引き流された仙台市沿岸の松の木の分布特性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp.I\_120-I\_125, 2012.
- 6) 今井健太郎, 原田賢治, 南幸弘, 川口誠史, 二宮栄一: 海岸樹木の津波耐力評価手法の高度化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp.I\_361-I\_365, 2013.
- 7) 二瓶泰雄, 前川俊明, 大嶋李香, 柳沢舞美: 宮城県名取市沿岸部における津波被害関数の推定と海岸砂丘の減災効果, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp.I\_276-I\_280, 2012.
- 8) 前川俊明, 二瓶泰雄, 中田遥香: 海岸砂丘・盛土による津波減災効果の検討: 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 69, No. 4, pp.I\_1453-1458, 2013.
- 9) 久保田徹, 仲座栄三, 稲垣賢人, Savau Rusila, Rahaman Mostafizur, 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp.I\_301-305, 2013.
- 10) 原田賢治, 油屋貴子, Latief Hmzah, 今村文彦: 防潮林の津波に対する減衰効果の検討, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 366-370, 2000.
- 11) 浅野敏之, 永山裕也, 松尾俊平: 海岸林の時間的生長を考慮した津波減衰効果に関する数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp.I\_1206-I\_1210, 2012.
- 12) 今井健太郎, 松富英夫: 沿岸植生域を氾濫する津波の水理, 土木学会論文集 B, Vol. 62, No. 3, pp. 258-269, 2006.
- 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp. 326-330, 2009.
- 14) Oshnack, M. E., Aguiniga, F., Cox, D., Gupta R. and van de Lindt, J.: Effectiveness of small onshore seawall in reducing forces induced by tsunami bore: Large scale experimental study, *Journal of Disaster Research*, Vol. 4, No. 6, pp. 382-390, 2009.
- 15) 稲垣賢人, 仲座栄三: 海岸丘と海岸林による津波防災対策の実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp.I\_296-300, 2014.
- 16) SAVAU Rusila, 仲座栄三, 稲垣賢人: 海岸護岸と海岸土手との組み合わせによる津波対策効果に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp.I\_296-300, 2014.
- 17) Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T. and Yanagisawa, H.: Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, 2011.
- 18) 仲座栄三, 稲垣賢人, 駒場悠輔, 入部綱清: 海岸林に残される津波痕跡過程と減災効果に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp.I\_271-I\_275, 2014.
- 19) 榊山勉: 陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp.I\_771-I\_775, 2012.
- 20) 飯村耕介, 田中則夫, 池田裕一: 樹林帯と堤防の位置関係の違いが樹木破壊や津波減災効果に与える影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp.I\_401-I\_405, 2013.
- 21) 土屋十囀: 津波に対する防潮林と消波工の一体型水理実験, *自然災害科学 (J. JSNDS)* 107, Vol. 32, No. 3, pp. 249-259, 2013.

(2016. 7. 27 受付)

## COMBINED MITIGATION EFFECTS OF FOREST, HILL AND SEAWALL AGAINST TSUNAMI

Kento INAGAKI, Eizo NAKAZA, Satoshi TANAKA and Carolyn SCHAAB

The construction of "green hills" in the lowland areas of the damaged Tohoku region are underway as a symbol of the reconstruction due to the mitigating effects that some hills contributed to during the 2011 huge tsunami event. In this study, after comparing the individual mitigation effects of a vegetation, dune and seawall against a tsunami, the combined mitigation effects of these elements were experimentally studied. It is shown that the countermeasure comprising of vegetation, dune and seawall can effectively reduce flood depth, flow rate, and specific energy, as well as further delay the tsunami arrival time. An examination of the amount of water transported by a tsunami to the area behind the coupled countermeasure shows the effectiveness of the comprehensive countermeasures.