

矩形潜堤による津波減災効果の実験

岸本 治*・平石 哲也**

Tsunami Mitigation due to Rectangular Submerged Breakwater

Osamu KISHIMOTO* and Tetsuya HIRAISHI**

Abstract

Submerged breakwater and artificial reef is widely implemented mainly to prevent beach erosion due to coastal currents. In case of tsunami period is relatively short, the artificial reef might reduce several energy of tsunami and prevent of scouring and beach erosion. The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami caused severe inundation in coastal area and huge number of people were lost by tsunami inundation. Breakwater itself was completely swashed and only several parts were remained. The remained part might reduce several energy of tsunami. Meanwhile several submerge breakwaters and artificial reefs are under constructed in many coastal areas facing to the risk of tsunami propagation. The paper describes the efficiency of submerged breakwater against tsunami through the several series of experimental study and has a target to applicability of submerged breakwater of wave energy reduction including tsunami waves.

キーワード：2011年東北地方太平洋沖地震津波，潜堤，人工リーフ，波の低減

Key words：2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami, Submerged breakwater, artificial reef, wave dissipating

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波では，青森県から千葉県まで沿岸に津波が押し寄せ多くの人命

と資産が失くされたことは記憶に新しく，今後も津波対策がより強く進められなければならない。政府では来たるべき東海・東南海・南海地震津波

* 国土交通省北海道開発局
Hokkaido Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

** 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本報告に対する討論は平成27年8月末日まで受け付ける。

の被害想定を実施し、10万人以上の死者が出るとの危惧も示されている。一方、津波が3連動や4連動でなく、単一の断層運動でも「発生頻度の高い津波」が生じる可能性があり、このような津波に対して既存の構造物がどこまで対応できるかを知っておく必要がある。

たとえば岩手県釜石港では、釜石湾における津波対策として湾口防波堤が平成20年に完成した。この湾口防波堤は明治29（1896）年三陸地震津波および昭和8（1933）年三陸地震津波を想定して建設されたが、今回の津波を受けて、ケーソンの滑動や転落、あるいはマウンドの局所的な洗掘などの被害が見られた。しかし一方で、数値計算によって防波堤の有無の両ケースを比較した場合、津波高の低減、浸水域の低減、水位上昇の遅延といった点で効果があったことが検証されている（高橋ら、2011）。また、津波による浸水被害が大きかった宮城県において、松島町は近隣の東松島市や塩釜市、七ヶ浜町などに比べて、浸水面積が非常に小さかった（小荒井ら、2011）が、これは松島湾の入り口にある島嶼部が防波堤の役割を果たし、津波の勢いを減衰させたと考えられている。こういった被災状況の検証から、発生頻度の高い津波の防災対策として、沖合での津波力の減衰が有効であると考えられる。

先述のとおり、東北地方太平洋沖地震津波では、沖合構造物・遮蔽物による減災効果があったことが報告されている。一方で、震災からの復興の過程で、巨大防潮堤や防波堤の建設計画の見直しを求める声も高まっており、景勝地や漁業を営む地域において、海や沖合が見えなくなるという景観面や、湾内・港内における海水の流れを妨げるとされる環境面で問題があるとされている。そこで本研究では、津波の沖合減災効果の手法として、通常、海岸の浸食対策に用いられている幅広潜堤（人工リーフ）（図1）に着目して実験を行った。

2. 潜堤の活用

潜堤は、堤体が水面下に没する消波構造物であり、このうち広い天端幅を有するものが幅広潜堤

または人工リーフとして定義されている。ここでは以下、潜堤と総称する。本構造物は、越波の軽減や海浜の安定化を目的として各地に設置されている（図1）。沿岸域における景観に影響を与えず、離岸堤よりも海水交換に優れることから環境保全にも適するというメリットを持つ（国土交通省河川局海岸室、2004）。これらのメリットから、新潟西海岸における海岸保全施設として大規模な潜堤（国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所ホームページ）や、天橋立海岸における浸食対策事業としての小型三角潜堤（平石ら、1999）等、大きさや形などが異なる様々なものが用いられている。

例えば、新潟西海岸では、信濃川における大河津分水、関屋分水の通水などの河川改修、新潟市内における地下水の汲み上げ等の影響による海岸侵食の対策として、当初は天端幅の狭い潜堤が、さらに1960年以降に天端が嵩上げされ、離岸堤が整備された（栗山ら、2007）。これらの整備により、汀線近傍の海岸侵食は抑えられたものの、離岸堤より沖では浸食が進行していることが1980年代に明らかになり、対策として低反射率の構造物が考えられ、沖合潜堤が選ばれた。現在は、潜堤・突堤及び養浜を複合的に組み合わせた面的防護工法による対策を実施しており、総延長2540mのうち、東側1630m区間に天端幅40mの1列潜堤が完成している。しかし、潜堤背後に洗掘溝が

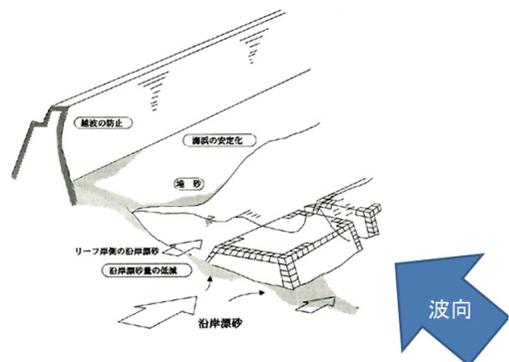


図1 人工リーフの効果
（人工リーフの手引き（改定版）（国土交通省河川局海岸室、2004）に加筆）

形成される地形変化が生じ始め、今後は洗掘影響の軽減が期待される2列潜堤を設置する計画が進められている(大下ら, 2010)。

栗山ら(2007)によると、幅広タイプの潜堤・人工リーフに関する研究では、波浪変形、海浜流、地形変化等に関する室内実験、現地観測、数値シミュレーションがなされてきたが、津波に対する減衰効果を検討した研究は行われていない。そこで、本研究では潜堤に着目するにあたり、構造物の高さと減衰効果の関係性を調べるため、基礎的な模型実験を行うこととした。

3. 潜堤を用いた津波実験

(1) 実験の概要

前述の背景をふまえ、本研究では津波減災、大型の潜堤に着目した。本章では、従来、津波防災に用いられてきた防波堤と潜堤の津波減衰効果の違いについて、矩形ケーソンを用いた混成堤で、津波を模擬した孤立波を造波し、津波高、流速の低減効果を調べる基礎実験を行った。本来、津波は周期が非常に長い波であり、孤立波とは異なる。

しかし、浅海域ではソリトン分裂などを生じるとともに、浅海では波形が急激に鋭くなる段波状になるため、初期の衝突力が最も強くなる。したがって、構造物に作用する津波波力は、初期状態で決まるので、ここでは、初期の津波衝撃力等を再現するものとして用いた。

今回の模型実験は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー第3実験棟にある多目的造波水路(水路長50m×水路幅1m×水路深さ1.5m)で行った(京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー, 2009)。図2に水槽の全景と詳細図を示す。詳細図に示すように、水槽内には、底面に勾配が設けられており、水路幅についても同様に幅を縮め、縮流させることで、沖合から沿岸に近づくに連れて増幅する津波を再現している。水路幅が縮まった区間に、図3に示すマウンドを設け、この礫で作成したマウンド上に防波堤、および潜堤を想定したケーソン(写真1)を設置した。縮尺は1/40である。写真2はケーソンをマウンド上に設置した場合の計測機の配置等を示している。

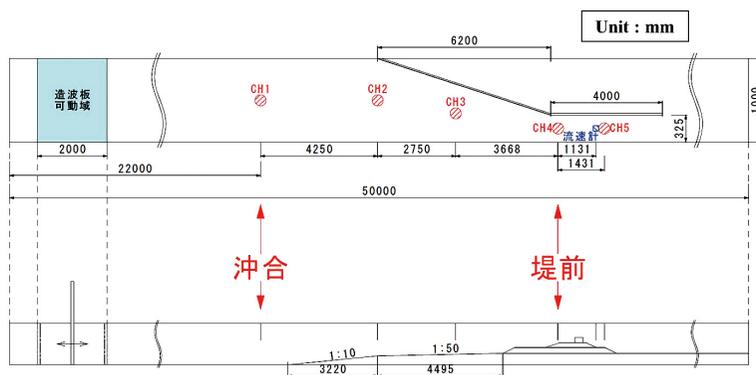


図2 水槽外観図と詳細平面図

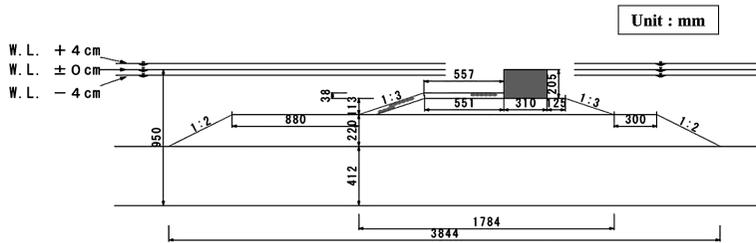


図3 実験領域断面図

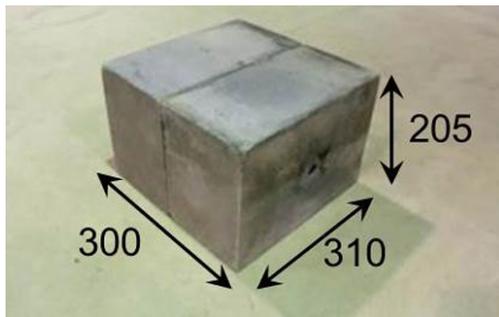


写真1 ケーソン模型の外観

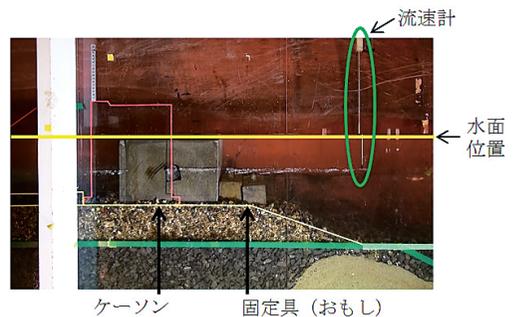


写真2 ケーソン周辺の計測機の配置

水深は水路底面から95 cmで、マウンド上の構造物天端と水面が一致するように設定し、この高さを基準水面とした。また、写真2にあるようにケーソン背後に重しを設置することで、孤立波が構造物に当たっている間、構造物は固定された状態で、その効果を発揮し続けるようにしている。すなわち、本実験で行った造波条件では、ケーソンは動かない。

図2の水路詳細図にある丸印に容量式波高計を設置した。設置した波高計は、沖側から順に、CH1からCH5としている。このうち最も沖合にあるCH1の最大津波高を沖合津波高、構造物の直前（沖合側）にあるCH4の最大津波高を堤前津波高とした。CH5は、ケーソン背後の津波高を測定するものである。また、流速計はケーソンが乗っているマウンド最上段の終端部に、水面から10 cmのところ計測部が位置するように設置した。波高計、流速計、各々のデータサンプリング間隔は50 msecであり、データ収録時間は孤立波が作用し、CH5の水位変化が収束するまでを集録

できるように約25秒としている。

(2) 実験条件

造波装置の性能上、実験のスケールにおいては、津波のような周期の長い波を造波することはできないため、今回の実験では津波を模擬するものとして孤立波を造波した。この装置で、設定値として入力されるのは、任意の水深に対する波高であり、任意の周期に設定することは難しい。そこで、今回は水深を変化させて、構造物天端が水没、水面と一致、干出する条件をはさんだ、以下の3パターン（表1）を設定した。

表中のCase1は、水面が構造物よりも4 cm高く（水深99 cm）、構造物が水面下に没した潜堤の状態とした。次に、Case2は、水面と構造物天端が一致した状態（水深95 cm）とした。さらに、Case3は、水面が構造物よりも4 cm低く（水深91 cm）、構造物天端が水面から干出した防波堤の状態とした。各ケースに、表2に示す設定津波高で2回ずつ計測し、実験を行った。

表1 実験パターン分類

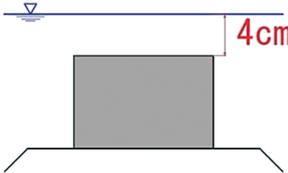
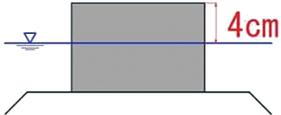
Pattern		
Case 1	Case 2	Case 3
		
水面=構造物+4cm	水面=構造物	水面=構造物-4cm

表2 構造物の諸元と作用津波

Case	設定波高		沖合波高	
	実験 (cm)	実スケール (m)	実験 (cm)	実スケール (m)
1 構造物 - 4 cm	5.0	2.0	5.02	2.01
	7.0	2.8	6.99	2.80
	9.0	3.6	8.80	3.52
	11.0	4.4	10.84	4.34
	12.0	4.8	11.94	4.77
2 構造物 ± 0 cm	5.0	2.0	5.21	2.09
	7.0	2.8	7.27	2.91
	9.0	3.6	9.27	3.71
	11.0	4.4	11.33	4.53
	13.0	5.2	13.32	5.33
3 構造物 + 4 cm	5.0	2.0	5.08	2.03
	7.0	2.8	6.93	2.79
	9.0	3.6	8.75	3.50
	11.0	4.4	10.65	4.26
	13.0	5.2	11.65	4.66

実験を行うにあたり、最初に構造物と水面の高さが一致する水深95cmの構造物を設置しない状態 (Case0) で、水路において造波される孤立波の特性を検討した。表3にCase0の条件を示す。図4に津波高の計測結果を示す。横軸には造波装置の設定津波高 (cm)、縦軸には津波高の実測値 (cm) を示しており、CH1での沖合津波高とCH4での構造物の堤前での津波高を掲載している。図から分かるように、設定値は沖合津波高と概ね一致する。また、水路の特性として、堤前では設定値の約1.66倍、沖合津波高に対しては約1.62倍の高さの津波高となった。

また、図5に最大流速の計測結果を示す。縦軸に設定津波高 (cm)、横軸に流速 (cm/s) をとっており、水路の縦断方向流速と横断方向流速の直交2成分をグラフに示している。この結果から、横断方向の流速は縦断方向に比べて非常に小さく、津波高が大きくなっても、ほとんど変化しないことが分かった。そこで、流速の解析については、流れ場で支配的な縦断方向流速に着目する。

ここでは、2回の実験結果の平均値により、沖合津波高や堤前津波高、構造物背後の津波高を求めると。

津波高については、堤前津波高と構造物背後の

表3 構造物がない状態の諸条件

Case	設定値		沖合津波高		堤前津波高	
	実験 (cm)	実スケール (m)	実験 (cm)	実スケール (m)	実験 (cm)	実スケール (m)
0	5.0	2.0	5.02	2.01	7.55	3.02
	7.0	2.8	7.51	3.00	11.39	4.56
	9.0	3.6	9.27	3.71	14.50	5.80
構造物なし	11.0	4.4	11.27	4.51	17.59	7.04
	13.0	5.2	13.34	5.33	21.03	8.41

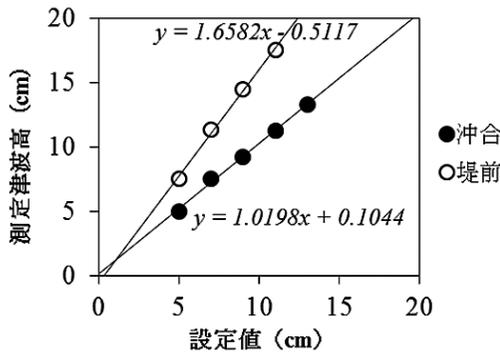


図4 津波高の計測結果

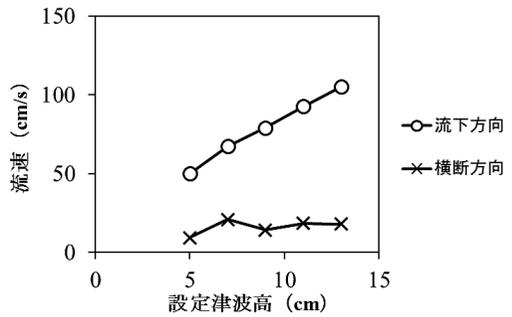


図5 最大流速の実験結果

津波高から、減衰率を以下の式(1)で定義する。

$$R = H_b / H_f \tag{1}$$

ここに、 R は減衰率、 H_f は堤前津波高 (cm)、 H_b は構造物背後での津波高 (cm) である。

式(1)では、CH4およびCH5の波高計の計測値を用いるが、検定をして、ゼロセットをしても水槽の長周期モードによって、各波高計の初期水面にズレが生じるため、計測結果をそのまま用いることができない。そこで、孤立波が測定される前の落ち着いた水面の状態の7.5秒間(150点)の平均値をとり、この平均値を各実験における水面の基準として実験結果を整理した。図6に観測波形の一例を、図7に水面の基準を修正した後の波形を示す。なお、2つのグラフはともに、縦軸が水位、横軸が時間である。

さらに、構造物なしの状態でもマウンドそのものの減衰効果があるため、式(1)で算出する減衰率を構造物なしの状態での減衰率で除して、実

効減衰率を算出する。

$$R_e = R / R_n \tag{2}$$

ここに、 R は減衰率、 R_n は構造物なしの状態と同じ設定津波高のときの減衰率、 R_e は実効減衰率である。

観測波形から周期・波長の変化を調べるため、ゼロアップクロス法(合田, 2012)を用いた。しかし、計測時間やあるいは水路の特性による振動が含まれることなどで、1つの波を定義することが難しい。そこで、今回は1つの波の前の閾値 T_f 、後ろの閾値 T_b を設定し、孤立波の水位が上昇しながら T_f を切るときを1つの波の始まり、 T_f を超えて、最大水位の後にやがて下降し、次に水位が上昇しながら T_b を切るときを1つの波の終わりとして定義することにした(図8参照)。CH1~CH3の沖側の計測点では、反射波の影響が観測波形に現れているため、今回波長を解析したのは、水深が等しい2つの計測点、構造物の手前にある

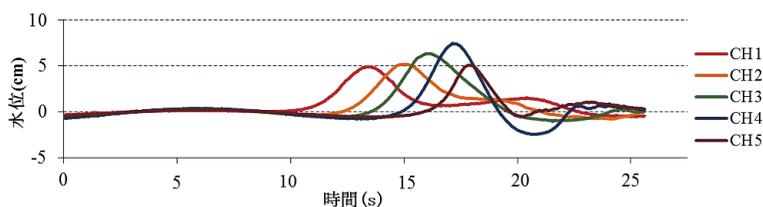


図6 観測波形の一例

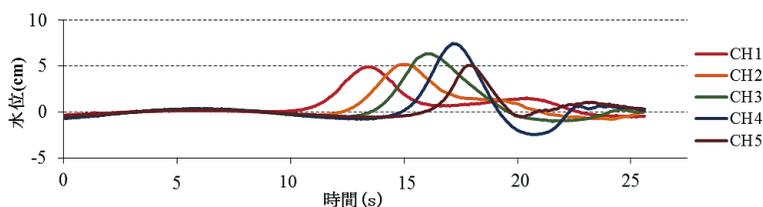


図7 水面基準修正後の波形

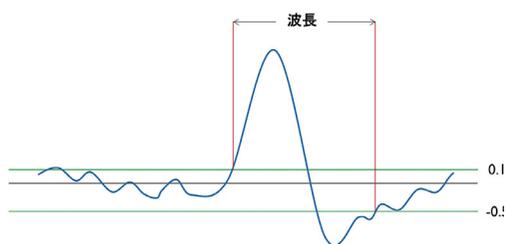


図8 個々の波の定義

表4 計測値に関する閾値

CH	T_f (cm)	T_b (cm)
4	0.2	-0.5
5	0.2	0

CH4と、構造物の背後にあるCH5での観測波形である。CH4と、CH5での観測波形の特徴から、各々の閾値を表4のように設定した。

そして、観測された水位の基準面を揃える修正を行ったデータから、まず1波の周期を求める。さらに式(3)で求められる波速を求め、式(4)を用いて、仮の波長を算出する(堀川, 1973)。

$$c = \sqrt{gh} \quad (3)$$

$$L = cT \quad (4)$$

ここに、 c は波速 (m/s)、重力加速度 $g=9.8$ (m/s²)、 h は水深 (m)、 L は波長 (m)、 T は1波の周期 (s) である。

こうした手順をふまえ、CH4における波長とCH5における波長の変化率 L_5/L_4 を調べる。

また、流速については、前述のとおり縦断方向のみの流速をそのまま用いて、最大流速を定義する。

4. 実験の結果と考察

(1) 津波高の減衰効果

本実験における各設定津波高とCH1で計測された実測の沖合津波高の関係は図9のようになっており、全てのケースで再現性のよい孤立波を造波していることが分かる。

全ての実験で得られた津波高の計測結果は表5に示す、実験結果から各パターン、各設定津波高での平均値とそれをもとに算出した減衰率、実効減衰率を表5に示す。また、沖合での津波高と減衰率の関係を図10に、堤前での津波高と減衰率の関係を図11に示す。さらに、沖合での津波高と実効減衰率の関係を図12に示す。横軸は、図10では

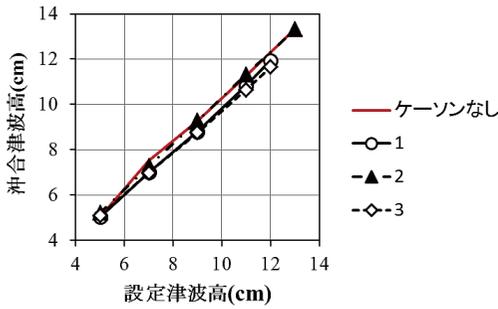


図9 設定津波高と沖合津波高の関係

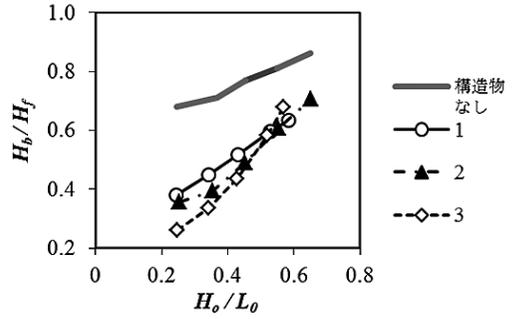


図10 津波高と減衰率の相関

表5 構造物ありの実験結果の一覧

Case	設定値 (cm)	沖合津波高 CH1 (cm)	波長 (CH4) (m)	波長 (CH5) (m)	波長変化率
0 構造物なし	5	5.021	12.96	8.60	0.669
	7	7.509	16.77	11.384	0.679
	9	9.274	13.79	10.33	0.749
	11	11.274	13.44	9.414	0.700
	13	13.336	13.53	9.589	0.709
1 - 4 cm 潜堤	5	5.023	15.345	10.137	0.661
	7	6.994	14.089	10.695	0.759
	9	8.805	14.508	6.882	0.474
	11	10.838	13.671	6.649	0.486
	12	11.937	13.717	3.255	0.237
2 ± 0 cm 潜堤	5	5.213	15.763	5.999	0.381
	7	7.269	14.974	5.692	0.380
	9	9.270	15.369	5.386	0.350
	11	11.334	14.143	3.809	0.209
	13	13.322	13.442	6.174	0.459
3 + 4 cm 防波堤	5	5.077	16.398	6.502	0.397
	7	6.980	15.498	7.360	0.475
	9	8.746	14.476	7.156	0.494
	11	10.648	14.149	3.026	0.214
	12	11.647	13.949	6.706	0.481

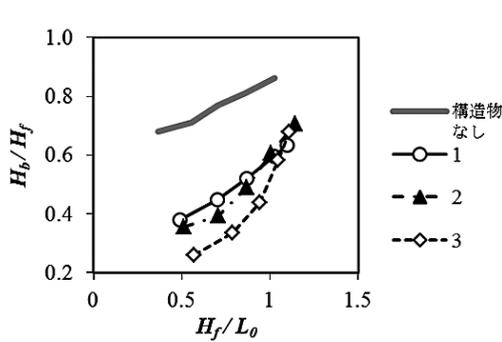


図11 堤前での津波高と減衰率

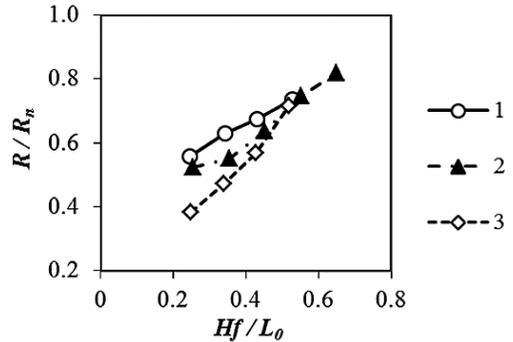


図12 沖合の津波高に対する実効減衰率

CH1で計測された沖合津波高 H_0 を、図11と図12ではCH4で計測された堤前津波高 H_f をそれぞれケーソンの高さ L_0 で無次元化している。

図10、図11に示すように、構造物を設置しない状態の Case0では、津波高が大きくなると、減衰率は線形的に増加し、潜堤の後の津波高 (CH5) は堤前津波高 (CH4) に比べておよそ68%から86%となり、これがマウンドそのものの減衰効果となる。さらに構造物を設置すると、構造物なしの状態よりもさらに30~40%減衰することが分かる。

図12では、潜堤の状態である Case1と水面と構造物の高さが一致する Case2に比べ、防波堤の状態となる Case3の効果の違いが現れている。沖合津波高が小さい時、Case3の減衰効果は他パターンに比べて比較的大きく、減衰率で10%程度、実効減衰率で14%程度増加する。実験時に集録したビデオ映像で確認すると、Case3の $H_0/L_0=0.25$ の場合、津波は構造物よりも7cmほど高い水深で越流したものの、写真3のように構造物背後に少し流れ込み渦が出来る程度で、右側に映る流速計付近 (CH5の波高計はさらに後ろに配置されている) では、ほとんど津波による水面の変化が見られない。

一方で、Case1の $H_0/L_0=0.24$ では、津波が越流する量はCase3に比べて大幅に増加し、写真4に示すように流速計付近よりもさらに遠くまで水面が顕著に変動していることが分かる。このように低い津波高で、ほとんど防波堤を越流しないような場合、構造物の高さが津波高の低減効果に大きく影響することが分かった。

しかし津波高が高くなるにつれて、Case1と

Case3の低減効果の差は小さくなり、 $H_0/L_0=0.5$ 程度では、構造物の高さに関わらず同程度の実効減衰率となった。実際に、ビデオの映像を確認してみると、Case3の $H_0/L_0=0.52$ のケースの場合、堤前での最大水位は構造物よりも約25cmも高く、Case1の $H_0/L_0=0.53$ の場合、堤前での最大水位は構造物よりも約26cm高くなり、構造物の高さが変わっても津波が構造物をはるかに越える様子は変わらない。

すなわち、越流量が大きくなると、減衰効果にさほど差が見られなくなると考えられる。ただし構造物背後では、越流した津波は、防波堤であるCase3のほうが潜堤であるCase1に比べて、高い位置から落ち込む流れとなるので構造物背後におけるマウンドの侵食の要因となる。

実際に写真5、写真6を見比べると、Case3のほうが構造物に近い位置に流れ込み、渦を作ること、マウンドの洗掘を引き起こす要因となっていることが分かる。

(2) 波長の変化と津波高減衰効果との関係

実験結果から各パターン、各設定値における波長の平均値の解析結果を表6に示す。また、CH4とCH5で計測された波長の関係のグラフを図13に示す。縦軸を構造物背後CH5での波長(m)、横軸を構造物手前CH4での波長(m)としている。さらに、図14に沖合津波高と波長変化率の関係のグラフを示す。こちらは、縦軸に波長の変化率 L_5/L_4 、横軸をCH1で計測された沖合津波高 (cm) としている。

図13から分かるように、構造物なしの場合、津



写真3 潜堤背後の越流状況 (Case3)



写真4 潜堤背後の越流状況 (Case1)

波はマウンドを通過した後もそれほど乱れないため、構造物を設置した状態に比べて、CH5での波長はCH4の波長から大きく変化しない。一方で、構造物を設置した3パターンは、津波が構造物を乗り越えてくるため、CH5での波長にばらつきが見られ、構造物の高さによる波長の変化について定性的な傾向を見ることは難しい。

図14について見ると、沖合津波高が約11 cm の場合のみ、構造物ありの3パターンで波長が顕著に短くなっているのを除くと、Case2やCase3ではおよそ構造物手前に比べて、構造物背後での波

長は40%程度に減少する。ただし、Case1では他のパターンと違い、小さい津波高の時に波長はあまり変化せず、構造物なしの状態と同程度で、構造物手前に比べて背後では70%程度に減少した。

人工リーフ設計の手引き（国土交通省河川局海岸室，2004）では、人工リーフの波浪低減効果を評価するにあたり、換算沖波波高と人工リーフ透過後の波高の比である波高伝達率 K_t と波長天端幅比 B/L_0 を用いている。本研究においても算出したCH4での波長(m)を用いて、波長天端幅比 B/L と減衰率 $R=H_b/H_f$ の関係を調べた。ここに、天端



写真5 津波高が大きくなった場合の背後の渦の様子 (Case3)



写真6 津波高が大きくなった場合の背後の渦の様子 (Case1)

表6 ケースごとの波長の平均値

Case	設定値 (cm)	沖合津波高 CH1 (cm)	波長 (CH4) (m)	波長 (CH5) (m)	波長変化率
0 構造物なし	5	5.021	12.96	8.669	0.669
	7	7.509	16.77	11.384	0.679
	9	9.274	13.79	10.33	0.749
	11	11.274	13.44	9.414	0.700
	13	13.336	13.53	9.589	0.709
1 - 4 cm 潜堤	5	5.023	15.345	10.137	0.661
	7	6.994	14.089	10.695	0.759
	9	8.805	14.508	6.882	0.474
	11	10.838	13.671	6.649	0.486
	12	11.937	13.717	3.255	0.237
2 ± 0 cm 潜堤	5	5.213	15.763	5.999	0.381
	7	7.269	14.974	5.692	0.380
	9	9.270	15.369	5.386	0.350
	11	11.334	14.143	3.809	0.209
	13	13.322	13.442	6.174	0.459
3 + 4 cm 防波堤	5	5.077	16.398	6.502	0.397
	7	6.980	15.498	7.360	0.475
	9	8.746	14.476	7.156	0.494
	11	10.648	14.149	3.026	0.214
	12	11.647	13.949	6.706	0.481

幅 B は0.31 mである。その結果を図15に示す。縦軸が $R=H_b/H_f$ 、横軸が波長天端幅比 B/L となっている。波浪低減効果の場合、 B/L_0 が大きくなることで、 K_t が減少し、 B/L_0 が大きくなると、 K_t の減少率が下がるとされているが、本実験で波長天端高比 B/L が小さく、ばらつきが少ないためその関係をとらえることは難しい。しかし、波浪低減効果と比較して、その傾向は異なっている。これは、波浪の場合、はちょうが津波に比べて大幅に短いため、 B/L_0 は大きく変化するとともに、潜堤幅のえいきょうが大きくなる。一方、実験で孤立波や津波を作用させた場合、波長が潜堤幅に比べて顕著に長くなるため、 B/L はほとんど変化しない。また、本実験では実験装置の性能上つなみたかが大きくなると波長が短く、 B/L が大きくなる傾向にある。つまり、 B/L が大きくなると、減衰効果が小さくなるという傾向は、津波高との相関を示した図15によく表れている。

(3) 最大流速の減衰効果

各パターン、各設定値で平均を算出した流速の実験結果を表7に示す。また、構造物背後におけ

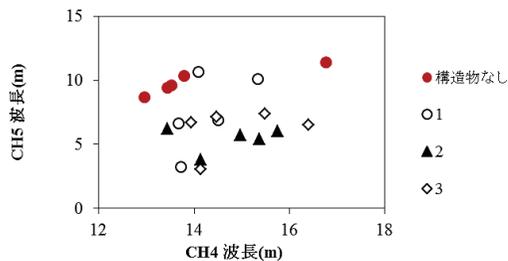


図13 マウンド前とマウンド後の波長の関係図

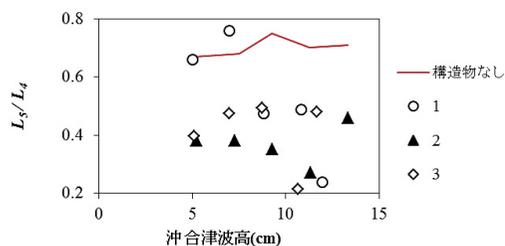


図14 沖合津波高と波長の関係

る縦断方向の最大流速の計測結果を図16に示す。縦軸が縦断方向流速 (cm/s)、横軸がCH1の沖合津波高 (cm) としている。

構造物がない場合、津波高が高くなるにつれ、水路の縮流効果により縦断方向流速はほぼ線形的に増加する。構造物を設置した場合、潜堤の状態である Case1, ならびに水面と構造物の高さが一致した状態である Case2では、構造物が無い状態よりも最大流速は大きくなる。そして、沖合津波高が Case1で8.8 cm/s, Case2で9.3 cm/s に至るまでは、津波高が増加すれば流速が急激に増加し、その増加の傾きは構造物が無い状態よりも大きい。さらに沖合津波高が増加すると、津波高に関わらず流速は約130 cm/s で一定となった。

一方で、防波堤の状態である Case3では、構造物なしの場合よりもはるかに最大流速は小さくなる。また、構造物なしの状態と同じような傾きで、津波高が大きくなるにつれて、最大流速も線形的に増加する。ただし、沖合津波高が11.6 cmの場合、最大流速は急激に増加し、構造物なしの場合よりも大きくなった。ビデオの映像を確認してみても、このケースのみ特異な状態となったわけではないため、この津波高のときは流速が急激に大きくなった理由は不明である。しかし、防波堤の状態においても、構造物を乗り越えた流れが次第に大きくなる傾向にあり、流速の減衰効果についても、津波高と同様、他のケースとの差が徐々になくなると考えられる。

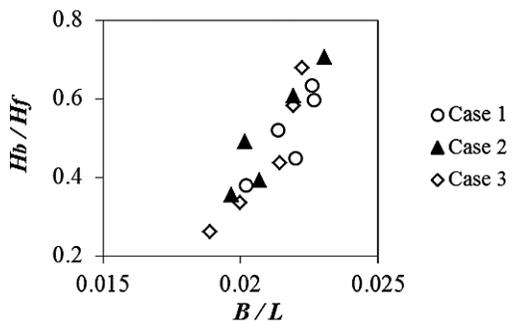
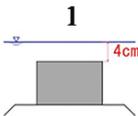


図15 本実験での減衰率と波高天端高

表7 津波高と最大流速

Case	設定津波高 (cm)	沖合津波高(cm) [CH1]	最大流速 (cm/s)
0 構造物なし	5.0	5.021	50.061
	7.0	7.509	67.380
	9.0	9.274	79.178
	11.0	11.274	92.603
	13.0	13.336	105.042
1 	5.0	5.023	61.664
	7.0	6.994	92.981
	9.0	8.805	128.625
	11.0	10.838	128.702
	12.0	11.937	128.629
2 	5.0	5.213	65.005
	7.0	7.269	116.153
	9.0	9.270	129.047
	11.0	11.334	128.922
3 	5.0	5.077	16.489
	7.0	6.980	25.946
	9.0	8.746	38.629
	12.0	11.647	109.198

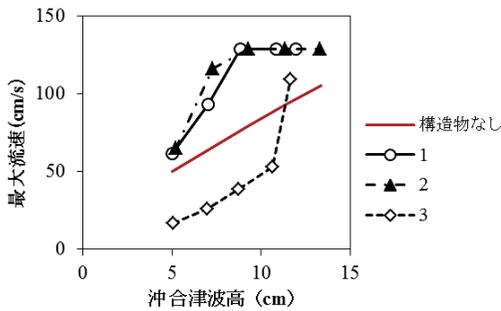


図16 津波高と最大作用流速

5. まとめ

本実験では、構造物の高さと津波の減衰効果の関係を検討するため、ケーソンを設置しない状態 (Case0)、ケーソンが水面下に没した潜堤の状態 (Case1)、ケーソンと水面が同じ高さの状態 (Case2)、ケーソンが水面から飛び出した防波堤の状態 (Case3) について、津波高、津波の波長の変化、流速について解析を行った。

①津波高においては、沖合での津波高が大きくなるほど、減衰効果は小さくなる。小さい津波高

の場合、構造物が水面に比べて高くなるほど、その減衰効果は大きく、特に防波堤がその効果を発揮することが分かった。これはビデオの映像を見た越流の様子から、越流量が他のパターンに比べて顕著に少ないためと考えられた。一方で、津波高が大きくなった場合、構造物の高さに関わりなく、減衰効果は同程度になることが分かった。そのような場合、ケーソン上における越流の高さははるかに高くなっているが、構造物が水面に比べて高くなるほど、越流した津波は高い位置から落ち込む流れとなる。そのため、防波堤ではケーソン背後でのマウンドの侵食が確認されるが、潜堤ではマウンドよりも後方に流れていくため、構造物を低くすることで、マウンドや構造物を粘り強く維持することにもつながると考えられる。

②波長については、実験装置の性能として、長周期の津波を起こすことができないため限定的ではあるが、ケーソンが無い状態に比べ、ケーソンを設置することで波長が短くなることが分かった。ケーソンを設置すると、津波が乗り越

えてくるため、波長は実験毎にばらつきが生じ、一概にその傾向を捉えることは難しい。今回の実験では、潜堤の状態となる Case1のみ他のパターンと比べて傾向が大きく異なるものの、水面とケーソンが同じ高さとなる Case2や防波堤の状態となる Case3では、ケーソン手前に比べて40%程度に波長が短くなった。

- ③最大流速については、沖合での津波高が高くなるほど、ケーソン背後における流速も大きくなる。静穏の状態からケーソンが水面に没している Case1, Case2では、ケーソンが無い状態よりも背後での流速は大きくなるが、津波高がある程度大きくなると、最大流速は一定となる。一方で、防波堤の状態である Case3は、津波高が小さい場合、他のパターンに比べて、流速を顕著に弱めるが、津波高がある程度大きくなると、急激に大きくなること分かった。

以上をまとめると、 $H_0/L_0=0.5$ より小さい場合、防波堤と潜堤では津波高の低減効果が大きく、実効減衰率では20%程度も変わることが確認された。しかし、 $H_0/L_0=0.5$ より大きくなると、構造物の背後における津波高や最大流速において、構造物の高さと減衰効果の相関がなくなる。つまり、越流量が多くなると、構造物の高さの津波の減衰への影響がほとんどないことが分かる。

今後の津波対策として、巨大津波に対しては越流することを前提に、防波堤等の構造物に対して粘り強い構造とすることが求められている。しかし、越流を前提とする場合、構造物が高いからといえど越流した場合は、津波高や流速が大きくなることを理解して適切な対応をとることが求められる。次章では、津波の対策工法として、構造物の形状が矩形とは異なる異種の潜堤を提案し、その津波減衰効果を検討する。

参考文献

大下善幸・山川一美：2列潜堤の水理機能を活用した新たな海岸侵食対策について、平成22年度北陸地方整備局 事業研究発表会 http://www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h22/ino_1/109.pdf 参照日2013-12-19, 2010.
京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー：

<http://rcfd.dpri.kyoto-u.ac.jp/openlab/> 参照日 2014-1-23, 2009.

栗山善昭・山口里実・池上正春・伊藤 晃・高野誠紀・田中純壺・友田尚貴：新潟西海岸における潜堤周辺の地形変化特性、港湾空港技術研究所報告, vol.46, pp.25-51, 2007.

小荒井衛・岡谷隆基・中埜貴元・神谷 泉：東日本大震災における津波浸水域の地理的特徴、国土地理院時報, No.122, pp.97-111, 2011.

国土交通省河川局海岸室：人工リーフ設計の手引き(改訂版)、社団法人全国海岸協会, pp.1-17, 2004.

国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所：<http://www.gicho.pa.hrr.mlit.go.jp/gyomu/mirai/kaigan.html> 参照日 2013-12-18, 2013.

鈴木康正・上原 功・富田康大・望月徳雄・平石哲也：フレネル潜堤による波向・波高変更効果に関する模型実験、海岸工学論文集, 第42巻, pp.701-705, 1995.

高橋重雄・戸田和彦・菊地喜昭・菅野高弘・栗山善昭・山崎浩之・長尾 毅・下迫健一郎・根木貴史・菅野甚活・富田孝史・河合弘泰・中川康之・野津 厚・岡本 修・鈴木高二朗・森川嘉之・有川太郎・岩波光保・水谷崇亮・小濱英司・山路 徹・熊谷兼太郎・辰巳大介・鷲崎 誠・泉山拓也・関 克己・廉 慶善・竹信正寛・加島寛章・伴野雅之・福永勇介・作中淳一郎・渡邊祐二：2011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, 200p, 2011.

平石哲也・北山 斉・佐藤恒夫・中野嘉和・大音 満・斎藤亮一・坂井隆行・岩垣雄一：小型潜堤による海浜安定工法の現地適用性について、海岸工学論文集, 第46巻, pp.731-735, 1999.

(投稿受理：平成26年4月3日
訂正稿受理：平成26年7月22日)