

津波の変形および波力特性に及ぼす 海岸断面地形の効果に関する実験的研究

EFFECT OF COASTAL CROSS SECTION ON CHARACTERISTICS OF TSUNAMI DEFORMATIONS AND FORCES

安田誠宏¹・高山知司²・山本博紀³

Tomohiro YASUDA, Tomotsuka TAKAYAMA and Hiroki YAMAMOTO

¹正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³テレビ大阪(株) (〒540-8519 大阪府中央区大手前1-2-18)

A big difference between the Andaman Sea coast and the coasts in the western countries of the Indian Ocean was found in damage state caused by the Indian Ocean Tsunami. It is thought that geographical features of the coastal cross-shore section affect the characteristics of the tsunami deformation and the damage situation of the coastal structures. In this paper, the model experiments were conducted to clarify the difference of deformation, breaking, runup or pressure of tsunami by the characteristic of the coastal cross section. The wave steepness and water depth on the reef are closely related to generation and development of dispersive solitons, and it is clarified that the impulsive breaking wave force takes place at the breaking of individual soliton. Tanimoto's empirical formula can be applied to estimate the wave force of tsunami on coastal structures when the dispersive solitons almost disappear due to these breaking or no dispersive solitons occur.

Key Words : *Tsunami, deformation, dispersion of soliton, impulsive breaking wave force*

1. はじめに

インド洋大津波によってインド洋沿岸諸国に甚大な被害が発生した。その被害の状況は、タイやマレーシアのアンダマン海沿岸とインドやスリランカのインド洋西側諸国沿岸とでは、大きな違いがみられた。アンダマン海はコーラルリーフが発達しているため、水深の浅い海域が広がっている。津波は浅海域に入ると非線形性と分散性が卓越してきて、ソリトン列としての挙動を呈するようになる。ソリトン分裂による短周期化に伴って、災害外力としてのポテンシャルは急速に高くなる。一方、インドおよびスリランカ沿岸は海底勾配が急なため、津波は沿岸付近で突如碎波して、エネルギーをあまり失わずに遡上することによって、大きな波力が作用する。このような前面海岸の地形特性が津波の変形特性に大きな影響を与え、それによって海岸構造物や家屋に作用する波力に違いが現れ、被災状況が異なると推測される。

本研究では、前面海岸地形の特性による津波の碎波や遡上、あるいは波力の違いを明らかにすることを目的として、模型実験を行った。そして、リーフ地形において

生じるソリトン分裂波の発生や発達、消滅の機構を明らかにするとともに、ソリトン分裂によって生じた短周期波の変形過程と波力との関連性を明らかにした。

2. 実験方法および条件

(1) 実験方法

図-1に示すようなリーフ状地形を対象に、水深を変化させて模型実験を行った。実験水路は長さ50m×幅1.0m×深さ1.5mのものを利用し、模型縮尺は1/100を想定した。水路長の制約上、リーフの長さは20mで水深一定とし、勾配が1/20あるいは1/50の海浜をリーフに接続させた。防潮堤を模擬した堤体模型を、海浜上の汀線より2cm高い位置に設置した。この堤体模型前面に波圧計を、地表面からそれぞれ1, 4, 7cmの位置に3台設置し、津波による波圧の鉛直分布を測定した。また、一部のケースについては、堤体模型を設置しない場合についても実験を行い、津波の遡上高を測定した。さらに、水路側面からビデオカメラでも撮影を行い、津波の変形過程を調べた。

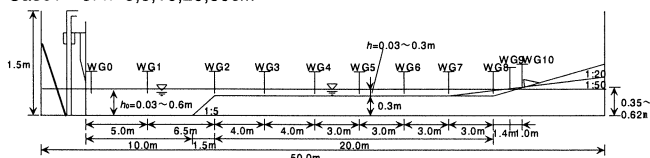
Case1~5: $h=3, 5, 10, 20, 30\text{cm}$ 

図-1 実験模型断面図

表-1 実験条件

		周期						現地(S=1/100)
		1.7	3.3	5.0	7.5	10.0	min	
津波高	2.0	—	—	△	△	△	sec	実験
	3.0	—	—	△	△	△		
	5.0	○	○	○	○	○		
現地	m	—	—	—	—	—		○: 全ケース実験を実施
S=1/100	cm	—	—	—	—	—		△: 一部実施
	実験	—	—	—	—	—		—: 対象外

(2) 実験条件

図-1に示すように、リーフ上の水深を $h=3, 5, 10, 20, 30\text{cm}$ の5種類に変化させた。3cmと5cmのケースは水深の浅いリーフが長く続く地形を想定しており、30cmのケースは水深が深く、急に陸上に接続する地形を想定している。そして、10cmと20cmのケースは、ソリトン分裂による影響が顕著に出る、もしくはソリトン分裂が発生する水深の限界を調べるために設けた。

津波高および周期をいくつか変化させた。実験条件を表-1に示す。ソリトン分裂が顕著に発生する条件を基準として、ソリトン分裂津波の発生および発達の違いを調べた。また、防潮堤に作用する波力の違いを比較し、ソリトン分裂津波の変形による影響を検討した。

3. 津波の変形特性

(1) 水深の違いによる影響

津波高と周期は同じ(振幅 $a_f=3\text{cm}$, 周期 $T=30\text{sec}$)で、水深が異なる場合についてのソリトン分裂津波の発生および発達形態の違いと、堤体前面に作用する波圧特性の違いについて検討する。最後に、水深の違いによる影響のまとめを記述する。

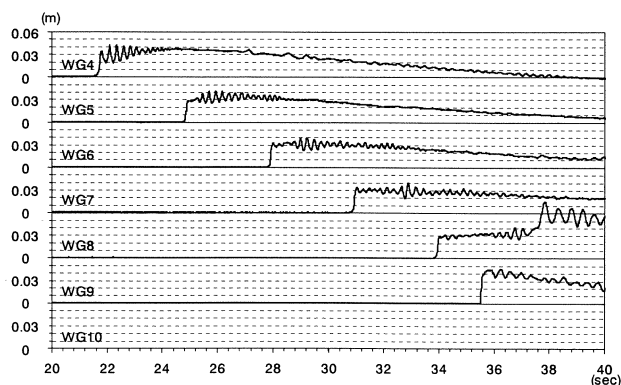
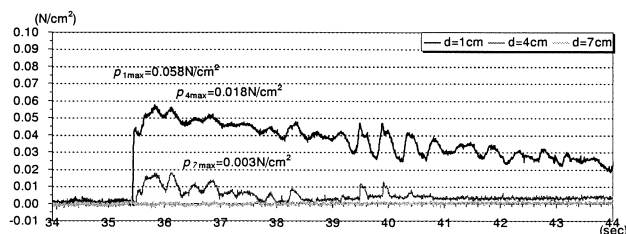
a) 水深: $h=3\text{cm}$

このケースは、リーフ地形を想定したものであるが、リーフ上の水深が浅すぎるために、津波の先端部でソリトン分裂が発生するかしないかのうちに砕波してしまった。リーフ上を伝播する途中で、津波の後部でもソリトン分裂が少し発生するが、すぐに砕波する。そして津波は、段波状になって陸上に遡上する。

海浜上1cmの地点の波圧計での最大波圧は 0.029N/cm^2 しかなく、堤体前面に作用する波力は非常に小さい。波形からみて、静水圧成分のみが作用することがわかった。

b) 水深: $h=5\text{cm}$

WG4~WG9までの津波伝播の時刻歴を図-2に示す。このケースは、水深 $h=3\text{cm}$ のケースと同じように、リーフ地形を想定している。図示していないが、沖側のWG1で振幅が3cmであった津波は、リーフ上に進入して、WG2での振幅は浅水変形で4cmに増大する。さらに、

図-2 津波伝播の時刻歴 ($h=5\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)図-3 防潮堤に作用する波圧の時刻歴 ($h=5\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

WG3付近でソリトン分裂が発生し始め、WG4ではすでにソリトン分裂波の1波目が砕波し始めている。リーフ上を伝播する間に、ソリトン分裂波は1波目、次に2波目、3波目の順に大きく発達するが、ある波高に達すると砕波するので、順番に次から次へとしている。ソリトン分裂の発達には津波本体のエネルギーが使われるため、このように砕波が続いて起こることで津波本体の振幅も小さくなり、WG6では振幅は3cmに低下している。このようなリーフを伝播中にソリトン分裂波が完全に砕波してしまう条件では、津波本体のもつエネルギーも損失することがわかった。また、堤体から反射した津波が分裂しながら、沖方向に戻っているのがわかる。

堤体前面の波圧を図-3に示す。リーフを伝播中にソリトン分裂波が完全に砕波しているために、堤体前面には大きな波力は作用せず、静水圧成分のみが作用する。

c) 水深: $h=10\text{cm}$

WG4~WG10までの津波伝播の時刻歴を図-4に示す。リーフ上を11m進んだWG5の手前からソリトン分裂が発生し始め、リーフ上でソリトン分裂波が発達していく。そして、WG9では第1波目は5cm程度の波高まで発達していき、そしてWG9とWG10の間の位置でソリトン分裂波の1波目が砕波しており、2波目もWG10で砕波しかけているのがわかる。堤体直前でソリトン分裂波が充分に発達しているため、ソリトン分裂波は大きなエネルギーをもった状態で遡上している。

堤体前面の波圧を図-5に示す。ソリトン分裂波の1波目は砕波しているため作用波圧は小さいが、ソリトン分裂波の2波目は堤体直前で砕波するため、衝撃波圧が作用しているのがわかる。2波目の波圧は、海浜上1cmの地点の波圧計では最大 0.091N/cm^2 となっているが、その

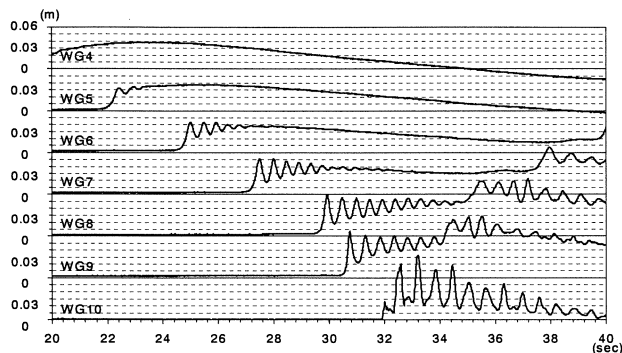


図-4 津波伝播の時刻歴 ($h=10\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

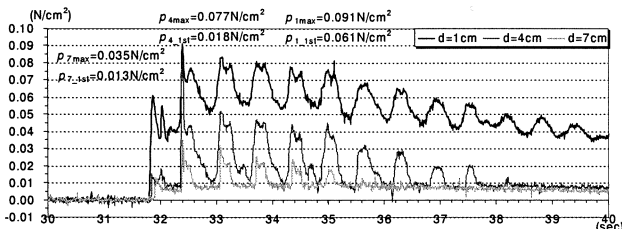


図-5 防潮堤に作用する波圧の時刻歴
($h=10\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

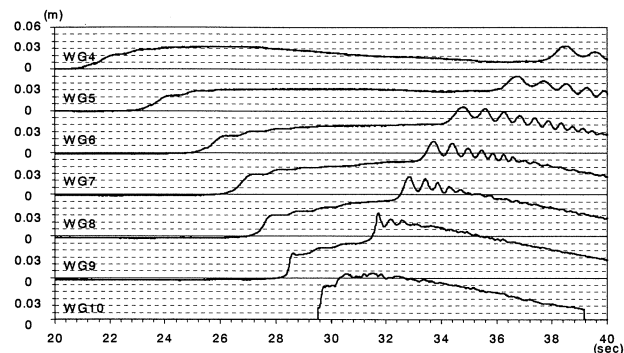


図-6 津波伝播の時刻歴 ($h=20\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

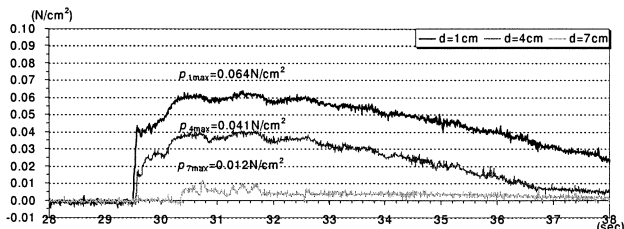


図-7 防潮堤に作用する波圧の時刻歴
($h=20\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

うち津波本体のものが 0.06N/cm^2 程度見込まれるために、ソリトン分裂波によるものは 0.03N/cm^2 程度である。また、海浜上4cmの地点の波圧計では、最大 0.077N/cm^2 となっており、津波本体の波圧が 0.02N/cm^2 であるから、第2波目の分裂波による波圧は 0.057N/cm^2 となっており、非常に大きな衝撃波圧が作用していることがわかる。海浜上7cmでの波圧計には、 0.035N/cm^2 とそれほど大きな波圧は作用していない。

d) 水深： $h=20\text{cm}$

WG4～WG10までの津波伝播の時刻歴を図-6に示す。この図から、津波の振幅に対する相対水深が深いために、ソリトン分裂波がほとんど発達しないうちに、津波が堤体まで到達しているのがわかる。本実験におけるリーフの長さは20mであるが、このケースに関してはソリトン分裂波が十分に発達するにはリーフの長さが不十分であったといえる。

堤体前面の波圧を図-7に示す。ソリトン分裂波がほとんど発達していないために、堤体前面の波形と同じ形状の波圧分布を示しており、津波本体のみの波圧が堤体に作用している静水圧波形となっていることが、この図より読み取られる。

e) 水深： $h=30\text{cm}$

このケースでも、水深 $h=20\text{cm}$ のケースと同様に、津波の振幅に対する相対水深が十分に深いために、ソリトン分裂波が全く発達しないうちに、津波が海浜上の堤体まで到達する。さらに、ソリトン分裂波が発達していないために、津波本体のみの静水圧が堤体に作用する。

- ・ 水深が浅いと、ソリトン分裂波は早く発達するが、リーフ上を伝播中に砕波してしまう。そのため、津波本体のもつエネルギーは大きく減衰する。

- ・ ある相対水深では、リーフ上を伝播中のソリトン分裂波の発達が顕著で、大きなエネルギーをもった状態で遡上する。堤体の直前でソリトン分裂波が砕波するために、陸上構造物には衝撃砕波圧が作用する。
- ・ 水深が深くなると、ソリトン分裂波は発生しにくくなり、陸上構造物には津波本体の圧力のみが作用する。

(2) 周期の違いによる影響

水深と津波高は同じ（水深 $h=10\text{cm}$ 、振幅 $a_f=3\text{cm}$ ）で、周期が異なる場合について、ソリトン分裂波の変形特性と堤体前面に作用する波圧特性の違いについて述べる。

a) 周期： $T=30\text{sec}$

(1)のc)（図-4および5）ですすでに述べたので省略する。

b) 周期： $T=20\text{sec}$

WG4～WG10までの津波伝播の時刻歴を図-8に示す。WG3を越えた付近からソリトン分裂が発生し始め、リーフ上でソリトン分裂波が発達していく。そして、WG9では1波目のソリトンは波高が6cm程度にもなって、堤体直前のWG9とWG10の間でソリトン分裂波の1波目が砕波している。a)の周期 $T=30\text{sec}$ の場合よりもソリトン分裂波は発達していて、より大きなソリトン分裂波のエネルギーをもった状態で遡上している。

堤体前面の波圧を図-9に示す。ソリトン分裂波の1波目は砕波しているため、作用波圧は小さい。衝撃的な波圧波形を示している2波目は、海浜上1cmと4cmの波圧計に衝撃波圧が作用している。海浜上1cmの波圧計では、最大で 0.072N/cm^2 となっているが、津波本体の静水圧を差し引くと 0.04N/cm^2 程度となっており、それほど大きくはない。海浜上4cmの波圧計では、最大で 0.076N/cm^2 で、津波本体部分が 0.01N/cm^2 であるから、分裂波そのものによる値が 0.066N/cm^2 となっており非常に大きい。3波目に

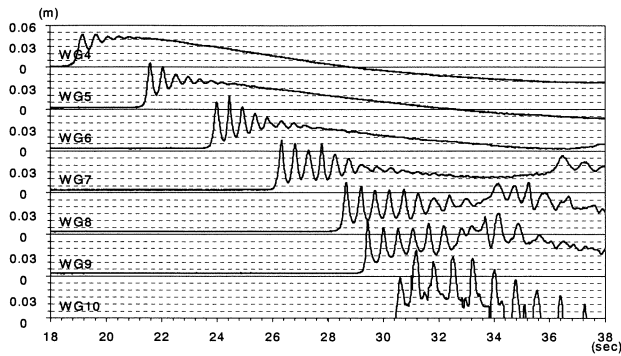


図-8 津波伝播の時刻歴 ($h=10\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

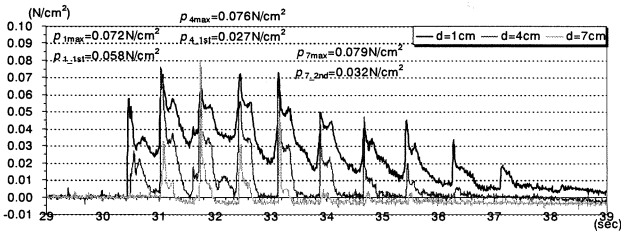


図-9 防潮堤に作用する波圧の時刻歴 ($h=10\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

なると2波目の反射波と入射波が重なって重複波になるため、海浜上1cmと4cmの波圧は小さくなる。

c) 周期: $T=45\text{sec}$

WG4～WG10までの津波伝播の時刻歴を図-10に示す。WG6付近からソリトン分裂が発生し始め、a)の周期 $T=30\text{sec}$ の時と比較するとゆっくりとしたスピードで発達していき、ソリトン分裂波があまり発達しないうちに、津波が堤体まで到達している。ソリトン分裂波があまり発達していないため、堤体直前でソリトン分裂波のもつエネルギーは、それほど大きくない。

堤体前面の波圧を図-11に示す。ソリトン分裂波の1波目が堤体に当たる時に、海浜上4cmの位置にある波圧計に 0.01N/cm^2 程度の小さな波圧が作用するが、7cmの位置にある波圧計には波圧は作用しない。このように、大きな波力は作用せず、静水圧成分のみが作用している。

- ・周期が短いほど、リーフ上を伝播中の早い段階でソリトン分裂波が発達する。その分、砕波時期も早くなる。
- ・周期が長いとソリトン分裂波はゆっくり発達するため、十分に発達するのに必要なリーフの長さは長くなる。

(3) 津波高の違いによる影響

水深と周期は同じ(水深 $h=20\text{cm}$, 周期 $T=20\text{sec}$)で、津波高が異なる場合について、ソリトン分裂波の変形特性と堤体前面に作用する波圧特性の違いについて述べる。

a) 振幅: $a_f=3\text{cm}$

WG4～WG10までの津波伝播の時刻歴を図-12に示す。WG3～WG4付近でソリトン分裂が発生し始め、WG9とWG10の間でソリトン分裂波の1波目が砕波している。発達するスピードはゆっくりで、ソリトン分裂波はあまり大きく発達していないが、津波が遡上していく過程で

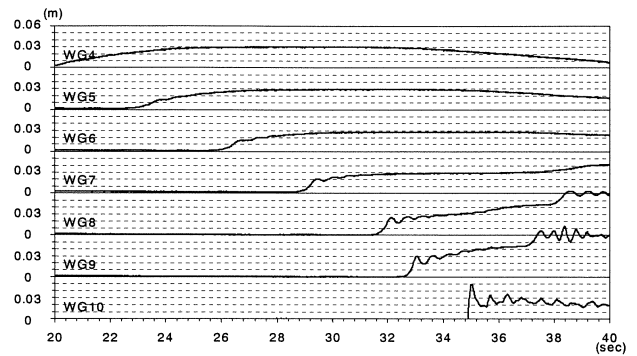


図-10 津波伝播の時刻歴 ($h=10\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=45\text{s}$)

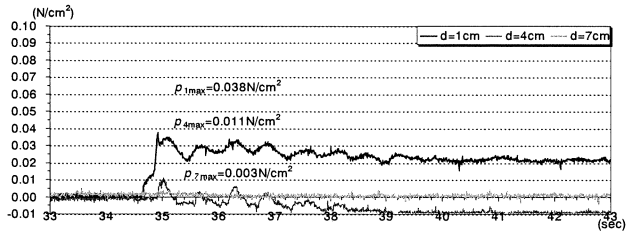


図-11 防潮堤に作用する波圧の時刻歴 ($h=10\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=45\text{s}$)

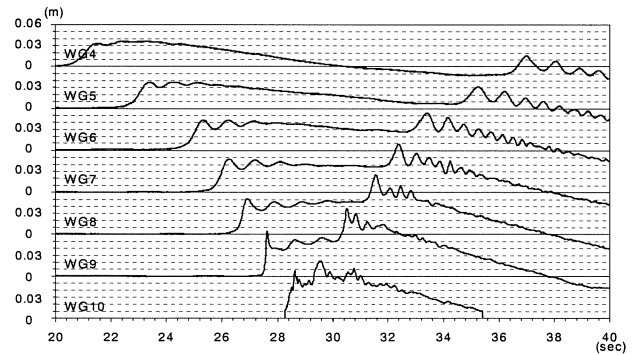


図-12 津波伝播の時刻歴 ($h=20\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

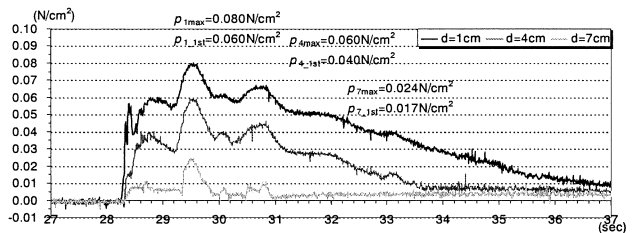


図-13 防潮堤に作用する波圧の時刻歴 ($h=20\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

1波目が砕波している。

堤体前面の波圧を図-13に示す。この図から、ソリトン分裂波の1波目は砕波しているため作用波圧は小さく、ソリトン分裂波の2波目は砕波していないため、それだけ波圧が大きくなっているが、静水圧的な波形を示している。

b) 振幅: $a_f=5\text{cm}$

WG4～WG10までの津波伝播の時刻歴を図-14に示す。WG3手前からソリトン分裂が発生し始め、分裂波は急激に発達し、WG8とWG9の間でソリトン分裂波の1波目が砕波している。a)の振幅 $a_f=3\text{cm}$ のケースと比較すると、

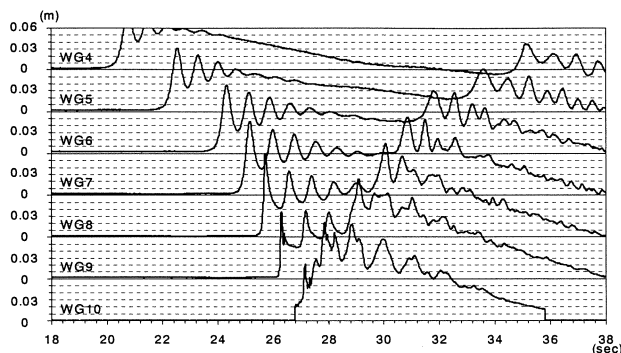


図-14 津波伝播の時刻歴 ($h=20\text{cm}$, $a_f=5\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

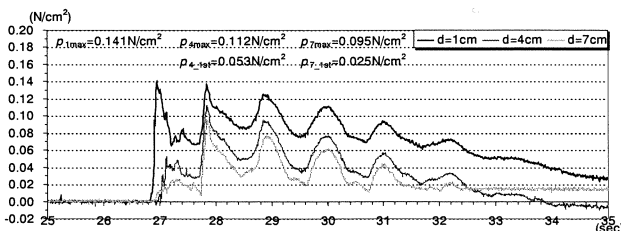


図-15 防潮堤に作用する波圧の時刻歴 ($h=20\text{cm}$, $a_f=5\text{cm}$, $T=20\text{s}$)

リーフ上での発達が非常に大きく、ソリトン分裂波はかなり大きなエネルギーをもった状態で堤体直前まで遡上している。

堤体前面の波圧を図-15に示す。海浜上1cmの波圧計では、 0.14N/cm^2 と非常に大きな波圧になっている。ソリトン分裂波の1波目は完全に砕波して、流れとなっているため、海浜上1cmの波圧計には動的な波圧が作用するが、4, 7cmの位置にある波圧計にはほとんど作用していない。一方、2波目からは振幅が大きいのに比例して、全体的に大きな波圧が作用している。

- ・津波高が大きいと、ソリトン分裂波の高さも大きくなる。ソリトン分裂波の大きさに比例して作用波圧も大きくなるが、津波高の影響だけで衝撃的な波圧が発生することはない。

(4) 海浜勾配の違いによる影響

海浜勾配が $S=1/20$ と $1/50$ の場合について比較した、WG7まではいずれのケースとも海底は水平で、水深一定である。 $S=1/50$ ではWG7から水深が浅くなり、 $S=1/50$ ではWG8からである。

WG4～WG10までの津波伝播の時刻歴を図-16に示す。図中、黒色の線が海浜勾配 $S=1/20$ で灰色が $1/50$ のケースである。WG5手前からソリトン分裂が発生し始め、リーフ上でソリトン分裂波が発達していき、WG8では既にソリトン分裂波は完全に砕波して遡上しているのが読み取れる。海浜勾配 $S=1/20$ のケースと比較すると、ソリトン分裂波の発生や発達にはほぼ同じであるが、 $S=1/50$ の場合は早い段階で完全に砕波してしまい、津波本体のもつエネルギーも損失していることがわかる。

堤体前面の波圧を図-17に示す。図-5に示した海浜勾

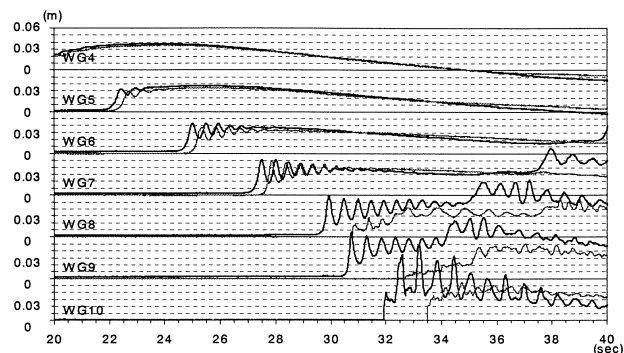


図-16 津波伝播の時刻歴 ($h=10\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$, $S=1/50$)

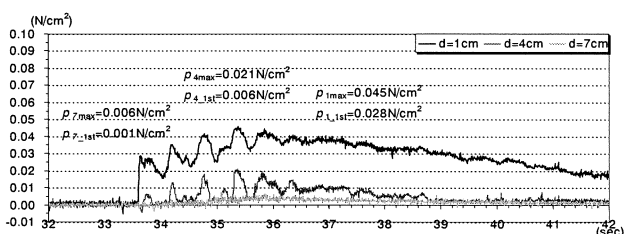


図-17 防潮堤に作用する波圧の時刻歴 ($h=10\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$, $S=1/50$)

配 $S=1/20$ のケースでは衝撃砕波圧が発生していたが、 $S=1/50$ では斜面を遡上している時にソリトン分裂波が完全に砕波してしまっているため、堤体前面には大きな波力は作用していない。

4. ソリトン分裂津波の波力特性

(1) 波形勾配の影響による波力の特性

実験によって得られた結果から、それぞれ水深 $h=5, 10, 20, 30\text{cm}$ における波形勾配の影響による波力特性を比較したものを図-18に示す。横軸は津波の波形勾配 a_f/L 、縦軸は最大波圧 $p_{\max}$ を単位体積重量 $w_0=\rho g$ と振幅 a_f で除して無次元化したものである。この図から、水深 $h=5, 10\text{cm}$ の場合は、波形勾配が 0.002 付近で波力は最大になり、それよりも波形勾配が大きくなるにつれて波力は小さくなっている。また、水深 $h=20, 30\text{cm}$ の場合では、波形勾配が 0.005 付近で波力は最大になり、それよりも波形勾配が大きくなるにつれて波力は小さくなっていく傾向が読み取れる。以上のことから、今回の実験に関しては、津波の波長に対する波高がある決まった値までは、津波波力は大きくなるが、その値を超えてしまうと、ソリトン分裂津波がその形状を維持することができず砕波してしまうために、結果的に津波波力は小さくなるということがいえる。

(2) 従来の波力算定式との比較

谷本ら²⁾は、水中部分に存在する直立壁に働く津波力の算定には、静水面上 η^* での0から静水面での p_1 までは直線分布、静水面下は p_1 で一様と仮定し、 η^* , p_1 を簡単に次のように与えている。

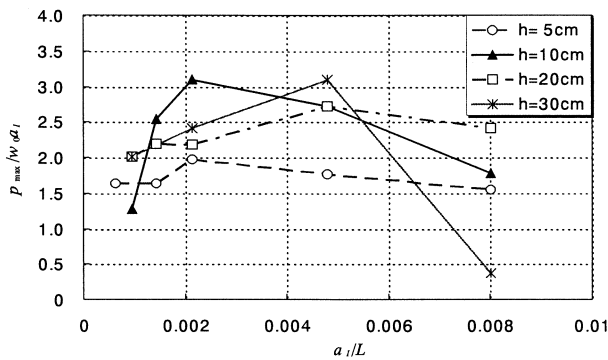


図-18 波形勾配に対する最大波圧の変化

$$\eta^* = 3.0a_I \quad (1)$$

$$p_1 = 2.2w_0a_I \quad (2)$$

ここに、 a_I は入射津波の静水面上の高さ（振幅）である。この静水面は、段波津波の場合には段波来襲直前での水位である。

一方、池野ら²⁾は、津波波圧分布の算定式を以下のように提案している。まず、分裂砕波後の場合は、谷本式と同様に、津波本体の重複波衝突時に静水面付近で最大波圧強度 p_1 が発生すると考えている。最大作用高さは、実験結果に基づき進行波段波振幅の3倍とし、 p_1 は静水面以下で一様分布としている。

$$p_1/(w_0a_I) = 2.0 \quad ; \quad 0 \leq h/L \leq 0.001 \quad (3)$$

$$p_1/(w_0a_I) = 250(h/L) + 1.75 \quad ; \quad 0.001 \leq h/L \leq 0.005 \quad (4)$$

$$p_1/(w_0a_I) = 3.0 \quad ; \quad 0.005 \leq h/L \quad (5)$$

ここで、本実験との比較においては、堤体が陸上部にあり、 $h=0$ であるため、式(3)より $p_1=2.0$ とした。

分裂砕波直前あるいは砕波点の場合は、分裂第1波の波面が、静水面上進行波段波振幅の2倍の高さに衝突し、最大波圧強度 p_2 が発生すると考えている。この時、進行波段波振幅の高さ以下では、波圧強度 p_3 になると考えている。 p_2 と p_3 は以下のように算定されている。

$$p_2 = 1.2p_1 \quad (6)$$

$$p_3 = 0.8p_1 \quad (7)$$

今回の実験における振幅 $a_I=3\text{cm}$ 、周期 $T=30\text{sec}$ 、水深 $h=5, 10, 20\text{cm}$ のケースに関して、波圧の実験結果と谷本式¹⁾を比較した。ただし、今回の実験は陸上部分に堤体を設置しているため、 a_I の値のとり方を検討する必要がある。 a_I は入射してくる津波の高さであるために、堤体を設置しない場合の実験結果から、堤体の直前面で完全に陸上部分にある波高計（ $h=5\text{cm}$ のケースではWG9、 $h=10, 20\text{cm}$ のケースではWG10）の位置での入射津波の高さを a_I とした。今回の実験では、陸上部に津波が近づくにつれてソリトン分裂を起こしているケースが存在するため、入射津波の高さを定めるのが困難である。そこで、ソリトン分裂波を移動平均して取り除いたものを、入射津波と考えることにした。そして、この移動平均した入射津波の最大の高さを読み取り a_I としている。

上記のことを考慮した上で、谷本式¹⁾と、3つの波圧計から得た実験結果を比較すると図-19のようになる。この図から、津波がソリトン分裂を起こす場合では、衝

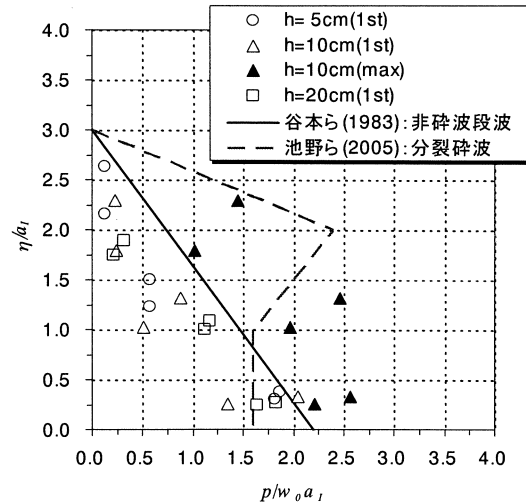


図-19 最大波力の鉛直分布

撃砕波圧が作用するケースを除けば、谷本式と傾きは一致しているが、それより小さい波力の値をとる。概ね谷本式が適用できるといえるが、陸上における通過波高を防潮堤がない場合について調べるか、もしくは遡上高から推定する必要がある。

一方で、衝撃砕波が発生するケース（ $h=10\text{cm}$ ）に関しては、谷本式と比較するとかなり大きい。また、池野ら²⁾によって提案されたソリトン分裂と砕波を伴う場合の津波による設計波力算定式と比較して、一致している結果もあるが、大きな波力の値をとっているものが多い。ソリトン分裂津波によって衝撃砕波圧が作用する場合については、新たな波力算定式を導く必要があるといえる。

5. おわりに

主要な結論をまとめると以下ようになる。

- 1) ソリトン分裂波の発生および発達には波形勾配や水深が深く関係しており、ソリトン分裂波が発達したまま遡上して砕波し、衝撃砕波圧が作用するような条件が存在することが明らかになった。
- 2) 津波本体の作用波圧は、谷本式による算定結果に比べてやや小さいが、分布の傾向は似ており、谷本式を概ね適用できることがわかった。
- 3) ソリトン分裂波が大きく発達して衝撃砕波圧が作用する場合には、池野らによって提案された式と傾向は一致せず、新たな波力算定式を導く必要がある。

参考文献

- 1) 谷本勝利, 高山知司, 村上和男, 村田 繁, 鶴谷広一, 高橋重雄, 森川雅行, 吉本靖俊, 中野 晋, 平石哲也: 1983 年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾技研資料, No. 470, 299p, 1983.
- 2) 池野正明, 松山昌史, 榊山 勉, 柳沢 賢: ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 751-755, 2005.