

ソリトン分裂津波の変形と波力特性に関する実験的研究

安田誠宏¹・高山知司²・山本博紀³

本研究は、水理模型実験によってソリトン分裂の発生を確認し、発生した短周期波の発達や碎波の機構と遡上および構造物に及ぼす波力を実験的に検討したものである。その結果、ソリトン分裂津波は水平な海底上を伝播するにつれて高くなり、碎波限界になるまで距離に比例して発達することが明らかになった。ソリトン分裂を伴う津波の遡上高算定式を提案し、陸上構造物位置での通過波高を遡上高算定式から求めて、修正谷本式で津波本体の波圧を算定する方法を提案した。さらに、ソリトン分裂津波の碎波が生じる条件について、修正谷本式と合田式を足し合わせることで津波の衝撃波圧を算定する方法を提案し、その有用性を確認した。

1. はじめに

1983 年の日本海中部地震によって発生した津波は、段波状になって秋田県能代沿岸に来襲し、能代港の埋め立て護岸を破壊した。このような状態での津波の来襲は珍しく、これが津波の非線形性と分散性によって生じたソリトン分裂波であることが実験によって証明されている(谷本ら, 1983)。このようなソリトン分裂の現象は、2004 年のインド洋大津波においても発生しており、タイ沿岸で撮影されたビデオで確認されている。

本研究は、水理模型実験によってソリトン分裂の発生を確認し、その発生要因を調べるにとどまらず、発生した短周期波の発達や碎波の機構と遡上および構造物に及ぼす波力を調べたものである。ソリトン分裂津波が発生する現象は、海岸断面の地形に密接に関連している。そこで、陸棚上の水深や海浜勾配によるソリトン分裂波の発生・発達および碎波、遡上の違いを実験的に検証する。また、ソリトン分裂波が構造物前面で碎波することによって、衝撃的な波力が発生することを示し、このような現象を考慮することで、津波防災対策に新しい方向を示すことを目的としている。

2. 実験方法

(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 50 m × 幅 1.0 m × 深さ 1.5 m 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 20 m 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。防潮堤を模擬した高さ 10 cm (実物で 10 m) の堤体模型を、海浜上の汀線より 2 cm (実物で

2 m) 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, 7 cm 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。波高計の数に限りがあるため、側面からもビデオカメラで撮影を行い、津波の変形過程を調べた。

(2) 実験条件

図-1 に示すように、リーフ上の水深を $h=3, 5, 10, 20, 30$ cm の 5 種類に変化させた。3 cm と 5 cm 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、30 cm 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、10 cm と 20 cm 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定した。

実験条件を表-1 に示す。津波高および周期をいくつか変化させた。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。

ソリトン分裂を伴う津波本体の振幅およびソリトン分裂波の波高を、以下のように定義した。測定された津波の波形から、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、この移動平均した津波の最大の高さを津波の振幅 a_I とした。移動平均した波形を基準とし、そこからの高さをソリトン分裂津波の波高 H_s とした。

3. ソリトン分裂津波の変形

(1) ソリトン分裂津波の発生

a) 水深: $h=5$ cm

WG1~WG9 までの津波伝播の時刻歴を図-2 に示す。このケースは、リーフ地形を想定している。沖側の WG1 で振幅が 3 cm であった津波は、リーフ上に進入して浅水変形で、WG2 での振幅は 4 cm に増大する。

1 正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所
2 フェロー 工 博 京都大学教授 防災研究所
3 テレビ大阪(株)

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

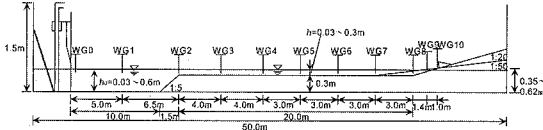


図-1 実験模型断面図

表-1 実験条件

			周 期						
			1.7	3.3	5.0	7.5	10.0	min	現地 (S = 1/100)
			10	20	30	45	60	sec	実験
津 波 高	2.0	2.0	—	—	△	△	△		
	3.0	3.0	○	○	○	○	○		
	5.0	5.0	○	○	—	—	—		
	m	cm						○：全ケース実験を実施	
	現地 S=1/100	実験						△：一部実施	
								—：対象外	

さらに、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 波目が碎波し始めている。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 波目の順に発達するが、ある波高に達すると碎波して、次から次へと順番に碎けている。ソリトン分裂波の発達には津波本体のエネルギーが使われるために、このように碎波が続いて起こることによって津波本体の振幅も小さくなり、WG6 では振幅は 3 cm に低下している。このようなリーフ上を伝播中にソリトン分裂波が完全に碎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。リーフ上を伝播中にソリトン分裂波が完全に砕波するために、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。

b) 水深： $h=10\text{ cm}$

WG4~WG10 までの津波伝播の時刻歴の詳細図を図-4 に示す。リーフ上を 11 m 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 波目は波高が 5 cm 程度まで発達していき、WG9 と WG10 の間の位置でソリトン分裂波の 1 波目が碎波しており、2 波目も WG10 で碎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十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波目は碎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波目は堤体直前で碎波するため、衝撃波圧が作用しているのがわかる。第2波目の波圧は、海浜上1

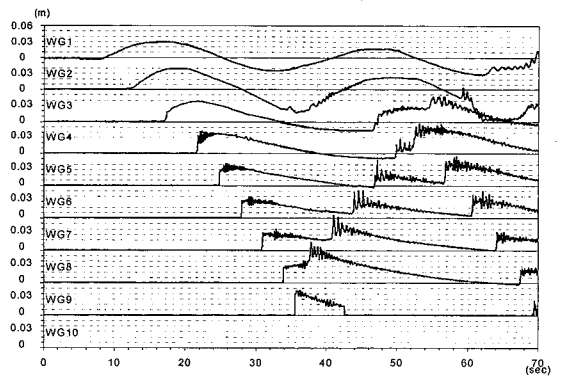


図-2 津波伝播の時刻歴 ($h=5\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

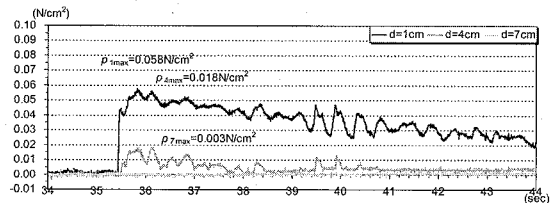


図-3 防潮堤に作用する波圧の時刻歴
($h=5\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

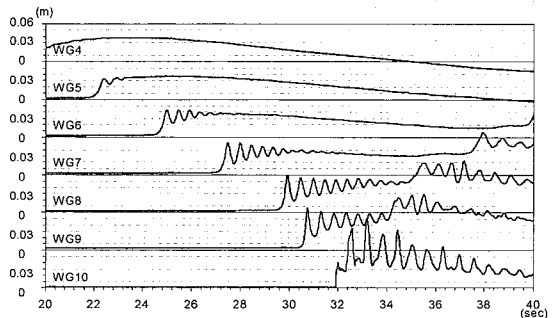


図-4 津波伝播の時刻歴 ($h=10\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

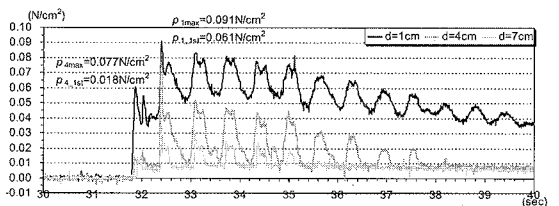


図-5 防潮堤に作用する波圧の時刻歴
($h=10\text{cm}$, $a_f=3\text{cm}$, $T=30\text{s}$)

cm の地点の波圧計では最大 0.091 N/cm^2 となっているが、そのうち津波本体のものが 0.06 N/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 0.03 N/cm^2 程度である。また、海浜上 4 cm の地点の波圧計では、

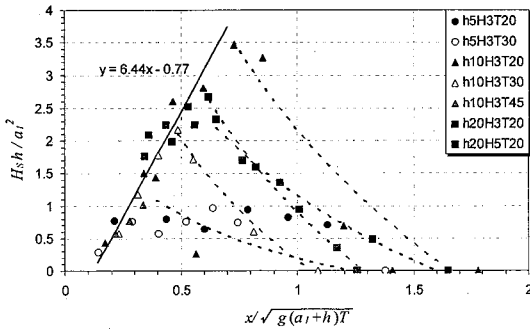


図-6 ソリトン分裂津波の発生、発達過程およびその限界

最大 0.077 N/cm^2 となっており、津波本体の波圧が 0.02 N/cm^2 であるから、第2波目の分裂波による波圧は 0.057 N/cm^2 となって、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 7 cm での波圧計には、 0.035 N/cm^2 とそれほど大きな波圧は作用していない。3～6 波目まではソリトン分裂波の波高が高く、碎波はしていないので、峰で2山型の有限重複波の波圧波形になっている。7 波目以降はソリトン分裂波の波高が小さいので、1山型の波圧波形を示している。

(2) ソリトン分裂津波の発達およびその限界

図-6 はソリトン分裂津波の発生、発達過程およびその限界を示したものである。縦軸はソリトン分裂津波の波高 H_s 、横軸は伝播距離 x をそれぞれ無次元化したものである。この図より、ソリトン分裂津波は、水平な海底上を伝播するにつれて波高が高くなり、碎波限界になるまで伝播距離に比例して発達することがわかった。その碎波限界はソリトン分裂波高 H_s と全水深 $(h + a_l)$ の比 $H_s / (h + a_l)$ が約 0.2 である。碎波限界を迎えた後、水深が浅い $h = 5 \text{ cm}$ の場合には $H_s h / a_l^2$ がおよそ $0.5 \sim 1.0$ の間で伝播し、それ以上深い場合には徐々に減衰することがわかる。

4. ソリトン分裂を伴う津波の遡上

(1) 従来の津波遡上高算定式

津波の遡上に関する理論式として代表的な式を以下に3つ挙げる。

・首藤の理論式 (1970)

$$\frac{R}{H} = \frac{1}{J_0(U)}, U = 4\pi \frac{l}{L}$$

$$\text{ただし, } 1.6 \times 10^{-2} \leq \frac{l}{L} \leq 1.2 \times 10^{-1} \dots \dots (1)$$

・Keller & Keller (1964), 首藤の理論式 (1972)

$$\frac{R}{H} = \frac{1}{\{J_0^2(U) + J_1^2(U)\}^{1/2}}, U = 4\pi \frac{l}{L}$$

適用範囲は特になし $\dots \dots (2)$

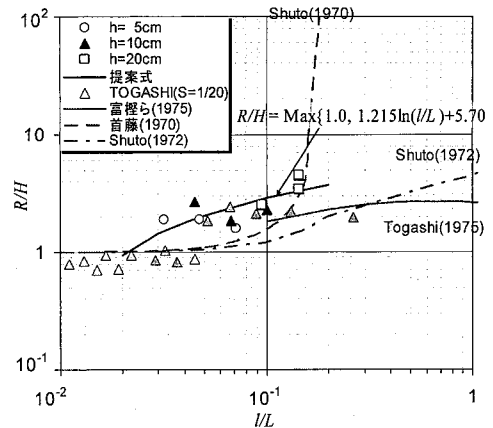


図-7 ソリトン分裂を伴う津波の遡上高

ここで、 R : 遡上高、 H : 入射波高、 L : 波長、 l : 斜面のり先から汀線までの距離である。また、 $J_0(U)$ と $J_1(U)$ は、それぞれ0次と1次のベッセル関数である。

これら2つの式は、微小振幅長波の完全重複波として求めた線形理論式であるため、碎波のような非線形性の著しい現象を含む幅広い領域には適合できない。そこで、富樫ら (1975) はここに両理論式の隙間を埋めるような、有限振幅長波を対象とした次式のような実験式を提案している。

・富樫らの実験式 (1975)

$$\log\left(\frac{R}{H}\right) = 0.421 - 0.095 \log\left(\frac{l}{L}\right) - 0.254 \left\{ \log\left(\frac{l}{L}\right) \right\}^2$$

$$\text{ただし, } 10^{-1} \leq \frac{l}{L} \leq 1.3 \dots \dots (3)$$

(2) ソリトン分裂を伴う津波の遡上高

上記の各式と今回の堤体がないケースにおける遡上高の実験結果を図-7に示す。横軸は波長 L に対する斜面のり先から汀線までの距離 l 、縦軸は入射振幅 a_l に対する遡上高 R である。なお、図中には上記した各理論式と富樫ら (1975) による海浜勾配が $1/20$ の実験結果を併せて示している。

この図からわかるように、今回の実験では、水深 $h = 20 \text{ cm}$ での2ケースは首藤の理論式 (1970) と一致しているが、それ以外のケースに関しては、首藤の理論式 (1970), Keller & Keller (1964)・首藤の理論式 (1972), 富樫らの実験式 (1975) のいずれの式にも当てはまらない結果がでてい。津波がソリトン分裂を起こして陸上に遡上する場合を対象として、次式のような新たな遡上高算定式を提案する。

$$R/H = \text{Max}\{1.0, 1.215 \ln(l/L) + 5.70\} \dots (4)$$

5. 陸上部におけるソリトン分裂を伴う津波の波力

(1) 陸上部における津波本体の波圧

谷本ら (1983) は、水中部分に存在する直立壁に働く津波圧の算定には、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。

$$\eta^* = 3.0a_I \dots\dots\dots (5)$$

$$p_1 = 2.2w_0a_I \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 a_I は入射津波の静水面上の水位 (振幅)、 w_0 は単位体積重量である。

a_I は入射してくる津波の高さであるため、堤体を設置しない場合の実験結果から、堤体設置位置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) で測定した通過波高を a_I とした。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場合には、入射津波の高さを定めるのが困難である。ここでは、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、移動平均した波形による波圧を津波本体によるものとしている。ソリトン分裂波による波圧については次節で考察する。

図-8 に示すように、ソリトン分裂波がほとんど発生しないか、発生したとしても碎波してしまう場合の津波本体の波圧については、概ね谷本らの式 (1983) (図中：灰色の実線) が適用できる。しかし、陸上部においては津波の作用高が小さくなるため、波圧算定式としては、次式のように係数を若干小さく補正したもの (図中：黒色の実線) を用いるのがよいと思われる。

$$\eta = 2.5a_I \dots\dots\dots (7)$$

$$p_1 = 2.0w_0a_I \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 η は地盤からの高さである。

波圧算定式には構造物がない場合の通過波高 a_I を用いる必要があるが、すべての波浪条件について堤体を設置しない場合の実験ができるわけではない。そこで、陸上部における防潮堤位置での通過波高を、式 (4) の遡上高算定式から求める方法を考えた。図-9 に示すイメージ図において、遡上高 R と一様水深における津波の振幅 a_{I0} から、一点鎖線のように線形補完することで、防潮堤位置における通過波高 a_I が推定できると仮定した。遡上高算定式から推定した通過波高 (a_I)_{est} と実験値 (a_I)_{exp} とを比較したものを図-10 に示す。この図より、推定値の方が大きくなるが一次近似できるので、補正係数 0.57 を掛けることで、通過波高が求められるものとした。

算定した通過波高を、式 (7) および (8) の修正谷本式に代入して波圧を求めた。波圧推算値 (p_1)_{est} と実

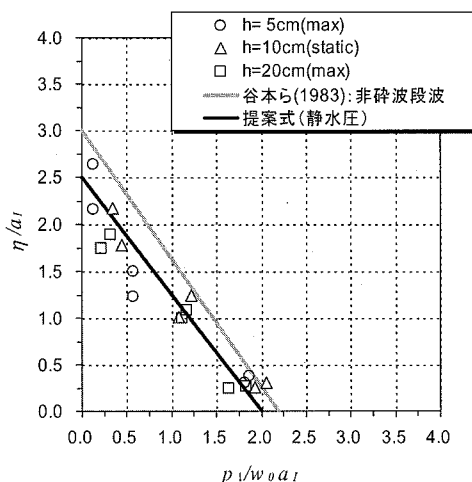


図-8 ソリトン分裂を伴う津波の陸上構造物に作用する波圧分布

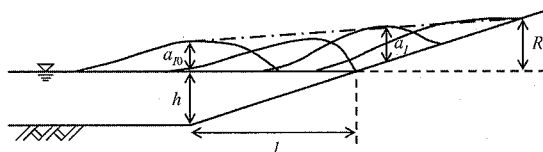


図-9 陸上部における防潮堤位置での通過波高算定方法のイメージ

験値 (p_1)_{exp} とを比較したものが図-11 である。若干のばらつきはみられるが、推算値と実験値との相関は 0.8 と非常に高く、今回提案した手法により、陸上構造物に作用するソリトン分裂を伴う津波本体の波圧 p_{1_static} が算定できるようになったといえる。

(2) ソリトン分裂津波の碎波による衝撃波圧

ソリトン分裂津波が碎波することによって衝撃波圧が生じる場合 ($h=10\text{ cm}$, $T=20$ or 30 s) について、ソリトン分裂津波による波圧を算定する方法を考える。

まず、津波本体による波圧 p_{1_static} の算定には、式 (7) および (8) に示した修正谷本式が適用できることが確認された。一方、ソリトン分裂波については、津波本体の水位 a_I を水深 h と見なすことで、合田 (1973) による次式で碎波限界波高 H_b が求められると考えた。

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left[1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^3 \theta) \right] \right] \dots\dots (9)$$

式 (9) で求めた波高 H_b を合田式 (1973) の H_{max} として、ソリトン分裂波による波圧 $p_{1_impulsive}$ を求め、修正谷本式による波圧 p_{1_static} を足し合わせることで、最大津波波圧が求められる。

本手法による算定値を図-12 に黒の波線で示す。衝撃波圧が発生する条件の▲のプロットと比べて、津波本体

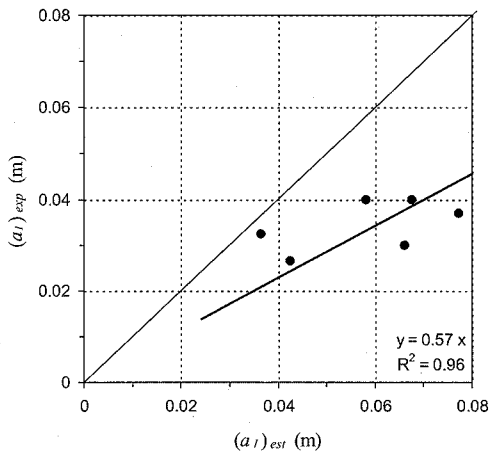


図-10 遡上高算定式を用いた通過波高推算値と実験値との比較

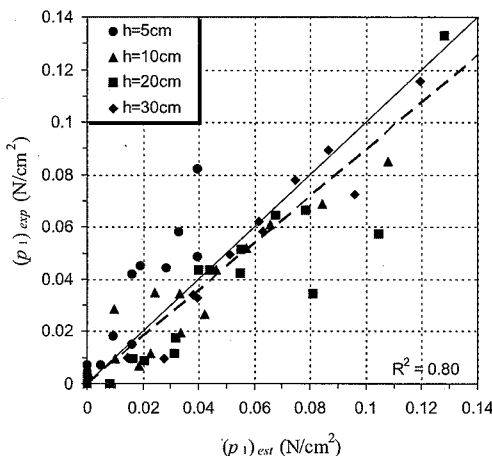


図-11 遡上高算定式を用いた波圧推算値と実験値との比較

の部分 ($\eta/a_1 < 1.0$) で実験値より若干大きい値を示すが、今回考案した方法は十分に適用可能といえる。同図に池野ら (2003) による陸上遡上段波の波圧算定式と、池野ら (2005) によるソリトン分裂と碎波を伴う津波の波圧算定式を載せているが、今回の実験結果との対応はよくない。

6. おわりに

主要な結論をまとめると以下になる。

- (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いる。ソリトン分裂波が発達したまま遡上して碎波する場合には、衝撃碎波圧が発生する。それ以外の場合には、津波本体の静水圧のみが作用する。
- (2) ソリトン分裂津波は、水平な海底上を伝播するにつ

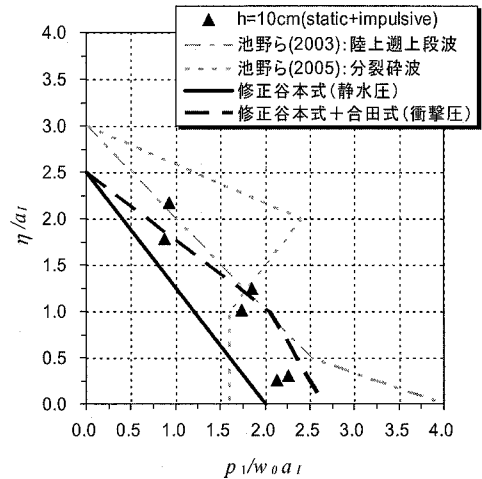


図-12 ソリトン分裂波による衝撃碎波圧が発生する場合の波圧分布

れて水位が高くなり、碎波限界になるまで伝播距離に比例して線形的に発達する。

- (3) 津波がソリトン分裂を起こして陸上に遡上する場合を対象にした、新たな遡上高算定式を提案した。
- (4) 陸上構造物に作用する津波本体の波圧は、谷本式と分布の傾向は似ているが、全体的に値が小さいため、谷本式の係数を補正した式を提案した。
- (5) 陸上構造物位置での通過波高を遡上高算定式から求める方法を提案し、ソリトン分裂を伴う津波の波圧を算定できることを確認した。
- (6) 衝撃波圧が生じる条件について、修正谷本式で求めた波圧に、合田式で求めたソリトン分裂波による波圧分を足し合わせて求める方法を提案し、適用可能なことを確認した。

参考文献

- 池野正明・田中寛好 (2003) : 陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 721-725.
- 池野正明・松山昌史・榊山 勉・柳沢 賢 (2005) : ソリトン分裂と碎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.
- 合田良実 (1973) : 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 12 巻, 第 3 号, pp. 31-69.
- 首藤伸夫 (1966) : 長波のうちあげ高, 第 13 回海岸工学講演会講演集, pp. 216-222.
- 谷本勝利他 9 名 (1983) : 1983 年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾技術資料, No. 470, 299p.
- 富樫宏由・中村武弘 (1975) : 津波の陸上遡上に関する実験的研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 371-375.
- Keller, J.B. and H.B. Keller (1964) : Water Wave Run-up on a Beach, Research Report No. NONR-3828(00), Office of Naval Research, Dept. of the Navy.
- Shuto, N. (1972) : Standing Waves in front of a Sloping Dike, Coastal Engineering in Japan, Vol. 15, pp.13-23.