

ソリトン分裂津波の大陸棚上での変形とその防波堤設計波圧 に関する実験的研究

池野正明*・松山昌史**・田中寛好***

1. はじめに

津波は、通常の海の波と比べると、水深がおおよそ 30 m 以下の浅海域でも波長が 20 km 以上にもなる非常に長い波である。そのため、この津波形状を歪めることなく実験で再現するにはかなり長い水路が必要となり、縮尺 1/100~1/200 程度の津波の無ひずみ模型実験例は非常に少ない。これに代わり、水平方向の縮尺を鉛直方向の縮尺より小さくする「ひずみ模型」を用いたり、津波の周期を実際よりも短く設定したり孤立波と見なして従来から数多くの津波実験が各々の目的に応じて実施され、有益な成果が得られている(野口他, 1997 等)。しかしながら、このような「ひずみ模型」では、例えば、浅い地点での津波のソリトン分裂等の複雑な変形、陸上への遡上高さ、護岸を越す津波の量、港湾構造物に作用する波力等、実際の津波の沿岸部での複雑な挙動を適切には再現できないことも指摘されている(谷本他, 1984; 鶴谷他, 1984; 野口他, 1995 等)。

そこで、本研究では、長さ 205 m の大型造波水路を利用して、実スケールの津波の 1/200 縮尺無ひずみ模型実験を実施し、まず津波波形を正弦波や孤立波で模擬して造波した場合、さらに断層モデルに基づく波源伝播数値シミュレーションによる津波波形を再現するように造波した場合の大陸棚上での浅水変形特性を比較検討し模擬した津波波形による変形特性の違いやソリトン分裂津波の発生条件を明らかにする。また、防波堤波圧実験を実施して顕著にソリトン分裂が生じる条件も含めた津波波圧特性を明らかにし新しい設計波圧算定式を提案する。

2. 大型造波水路を用いた津波実験

(1) 津波の造波方法

1) 正弦波を用いる方法：ピストン型造波板を、位置制御方式で中立位置より後方あるいは前方に引いた状態から、沖での振幅 $a_0=1\sim10$ cm (実スケール換算で 2~20 m), 周期 $T=20\sim100$ s (実スケール換算で 5~25

min) の正弦波を造波して、押し波初動あるいは引き波初動の津波を再現する。

2) 孤立波の造波理論を用いる方法：Goring (1979) による造波理論により位置制御方式で、波高 $H=2\sim20$ cm (実スケール換算で 4~40 m) の孤立波を造波する。

3) 沖合い津波の水位・流速の任意波形を入力制御する方法：断層モデルを用いた数値シミュレーション等により求めた沖合い津波の水位あるいは岸沖流速の時系列を基に、位置制御方式で造波する。まず、ピストン型造波板の変位 X_0 の速度と津波の水平流速 u との連続条件は、流速の鉛直分布は一様と仮定して、式 (1) となる。

$$\frac{dX_0(t)}{dt} = u(X_0, t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

上記の式を時間に関して積分すると、ピストン型造波板の変位 X_0 として、式 (2) が導かれる。

$$X_0(t) = \int_0^t u(X_0, t) dt = \int_0^t \left\{ u(0, t) + X_0 u_x(0, t) + \frac{X_0^2}{2} u_{xx}(0, t) \dots \right\} dt \approx \int_0^t u(0, t) dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、数値シミュレーション等で別途計算した津波の時系列が水位 η の場合には、線形長波を仮定して水平流速 u に変換する。

$$u(x, t) = \sqrt{\frac{g}{h}} \eta(x, t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 g は重力加速度、 h は造波水深である。

つぎに、断層モデルを用いた数値シミュレーション法として、本研究では、平面 2 次元を対象とした非線形長波理論に基づく方程式(後藤・小川, 1982)を用いる。連続式と運動方程式を leap-frog 法を用いて差分化して解く。断層モデルとしては、プレート沈み込み帯で発生する可能性のあるマグニチュード 8 クラスの低角逆断層を仮定し、沈降域が陸側に位置するものとする。本断層パラメータや地震エネルギーとマグニチュードとの関係の詳細は文献を参照されたい(池野他, 1998)。

この断層パラメータを基に、海底地盤の変動量を、Mansinha and Smylie (1971) の方法により算出し、その平面分布を初期水位として入力した。また、上記のマグニチュード 8 クラスの断層モデルにより発生する津波を

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部 主任研究員
** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部 主任研究員
*** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部 上席研究員

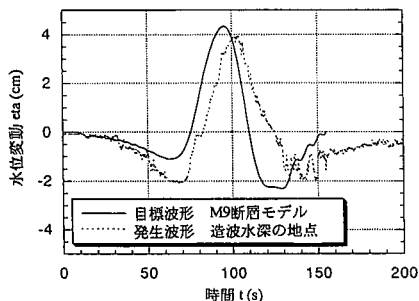


図-1 断層モデルによる津波の沖での目標波形と発生波形の比較

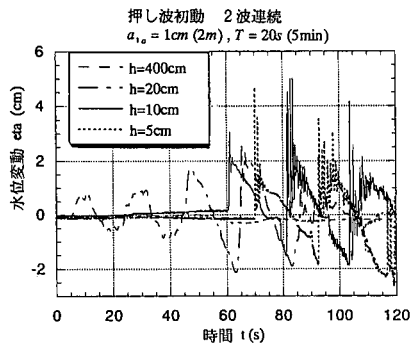


図-2 正弦津波の浅水変形・ソリトン分裂波形例

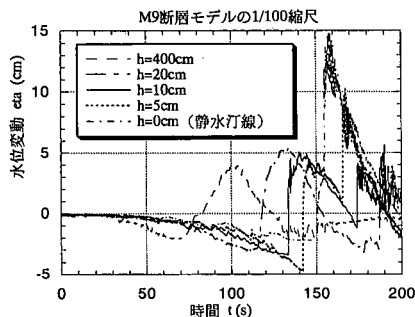


図-3 マグニチュード9クラスの断層モデルによる津波の浅水変形波形例

対象に予備実験をしたところ、沖合津波の波高が比較的小さく、大陸棚上でソリトン分裂が発生しなかったため、断層パラメータのうち、食い違い量6mを5倍の30m(実スケール値)に大きくして入力した場合も実験対象にした。松田式(1975)によれば、これはマグニチュード9クラスの食い違い量に対応する。

以上の方法により計算した水深800m(1/200縮尺で造波水深4mに対応)の地点での津波の岸沖流速あるいは水位変動をフルードの相似則により1/200~1/100縮尺に換算して実験に使用した。図-1は、マグニチュード9の断層モデルによる津波の1/100無ひずみ縮尺の場合の目標波形と造波水深での位置 H_1 における実際に発生した波形を比較した代表例である。ただし、目標岸沖流

速と目標水位の関係には式(3)を用い、造波板から計測位置 H_1 まで25m離れていることによる到達時間4s($\approx 25/(9.8 \times 4)^{1/2}$)を補正して出力している。図-1によると、造波板を式(1)~式(3)に基づき制御することにより、ほぼ目標どおりの津波波形が再現できる。図の掲載は省略するが、マグニチュード8クラスの断層モデルによる津波の造波水深での振幅は、図-1に示したマグニチュード9クラスの津波の振幅の1/5程度である。

(2) 大陸棚上での浅水変形および防波堤波圧実験

本実験で用いる大陸棚海底地形として、鶴谷他(1984)により日本海中部地震津波が伝播に伴い著しく段波状になりソリトン分裂を生じることが例証されている1/200勾配斜面を採用した。大陸棚海底地形は、水路の120mの区間で多数のパネル板と足場パイプをつなぎ合わせるにより、大陸棚や浅瀬の長さ・勾配を自由に設定できる。容量式波高計11台を一樣水深部および大陸棚上に配置し津波の水面変動を同時計測した。また、水平・鉛直2成分用電磁流速計4台を配置し津波の流速を水面変動とともに同時計測した。つぎに、大陸棚上の水深30m相当の地点に防波堤を設置し防波堤前面壁の6箇所と後面壁の2箇所に小型半導体式波圧計を取り付け、防波堤に作用する津波波圧を計測した。1チャンネル当たりの計測データのサンプリング時間間隔とデータ数は0.04sと8192個である。

3. 大陸棚上で津波の浅水変形とソリトン分裂の特性

(1) 大陸棚上で各種津波の変形特性

図-2に、押し波初動時の2波連続正弦津波の浅水変形・ソリトン分裂波形例を示す。図-2によると、大陸棚上での伝播に伴い、波形が切立ち著しい段波状に発達し、水深10cmの地点でソリトン分裂が生じている。また、第2波の方が第1波よりも顕著にソリトン分裂が生じている。これは、第2波ではその直前の引き波の存在により、正味の段波の振幅が第1波よりも大きくなるため、より早くソリトン分裂発生限界に達するものと推察される。さらに水深が浅くなると、分裂波はやがて碎波し消滅する。また、図-3に、マグニチュード9クラスの断層モデルによる津波の浅水変形波形例を示す。図-3によると、この津波は引き波初動であり、1波が150sのかなり長い周期の津波であることがわかる。この津波は大陸棚上で顕著に増幅されることもわかる。

ここで、ソリトン分裂波の浅水変形特性を調べるため、押し波・引き波初動時のソリトン分裂・段波振幅等を図-4のように定義する。上記のように定義して、押し波初動および引き波初動の場合を対象に、分裂波振幅・段波振幅比の岸沖変化を整理したのが、図-5および図-6

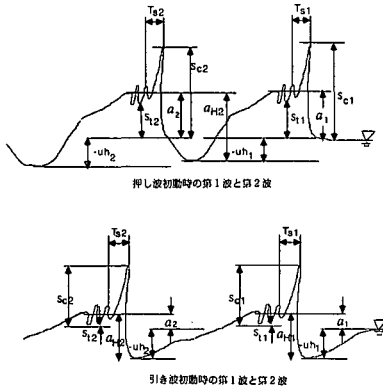


図-4 押し波・引き波初動時、第1波と第2波のソリトン分裂・段波振幅等の定義

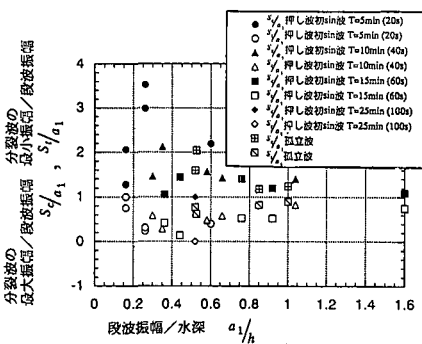


図-5 分裂波振幅・段波振幅比の岸沖変化 (押し波初動)

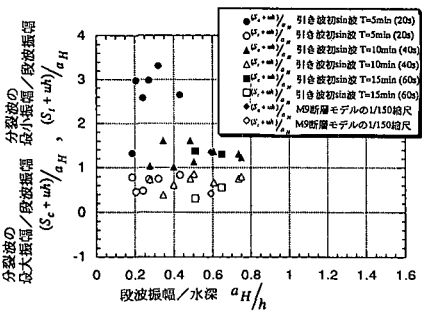


図-6 分裂波振幅・段波振幅比の岸沖変化 (引き波初動)

である。図-5～図-6によると、図-4のように定義すれば、押し波初動・引き波初動に係わらず、分裂波・段波の振幅比等の特性を統一して整理できる。また、分裂波の最大振幅は、周期 5 min (20 s) の正弦津波では段波振幅の 3 倍まで達するが、これ以外の周期の正弦津波や孤立波、断層モデルによる津波では、段波振幅の 2 倍程度である。また紙面の都合上、図の掲載は省略するが、図-4のように第1波と第2波のソリトン分裂・段波振幅等を定義すれば、押し・引き波初動の両者とも第1波、第2波に係わらず、分裂波・段波の振幅比の岸沖変化の特性を統一して整理できる。

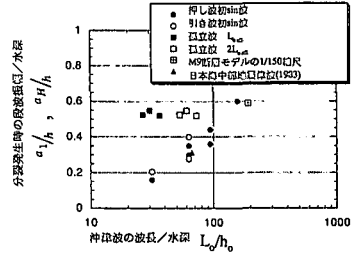


図-7 沖津波の波長・水深比と分裂発生時の段波振幅・水深比の関係

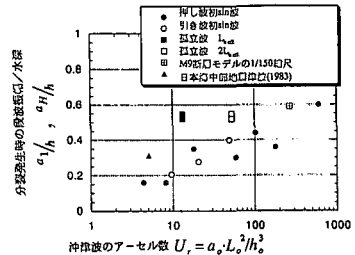


図-8 沖津波のアーセル数と分裂発生時の段波振幅・水深比の関係

(2) 緩勾配斜面上でのソリトン分裂限界指標の提案

本実験結果から得られた、津波のソリトン分裂発生限界をまとめると以下になる。まず、沖津波が正弦波の場合、図-7に示すように、押し波初動・引き波初動に係わらず、沖津波の周期 T あるいは波長 L_0 ($=\sqrt{gh_0} \cdot T$) が長いほど (波長・水深比 L_0/h_0 が大きいほど) 分裂しにくい。また、図-8に示すように、沖津波のアーセル数 $U_r (=a_0 \cdot L_0^2/h_0^3)$ が大きいほど分裂しにくい。さらに、断層モデルに基づく波源伝播数値シミュレーションによる津波の場合でも、分裂発生時のデータ数は少ないものの、その有効波長が同程度の正弦波のソリトン分裂発生限界値 (振幅・水深比) とほぼ等しくなっている。また、図中には 1983 年日本海中部地震津波が来襲した時の推定値 (谷本ほか, 1983) を併記している。以上の実験結果から、周期 20～100 s (実スケール換算で 5 min～25 min) および波源伝播数値シミュレーションによる津波に対して、ソリトン分裂が生じ得る段波振幅と水深の比 a_H/h の限界値として、まず、任意水深での沖津波の波長・水深比 L^*/h^* をパラメータとして次式が得られる。

$$a_H/h = -0.65 + 0.55 \cdot \left\{ \frac{1}{2} \log_{10}(h^*/h_0) + \log_{10}(L^*/h^*) \right\} \dots\dots\dots (4)$$

つぎに、任意水深での沖津波のアーセル数 $U_r^* (=a_H^* \cdot L^2/h^{*3})$ をパラメータとして、次式が得られる。

$$a_H/h = 0.01 + 0.20 \cdot \left\{ \frac{9}{4} \log_{10}(h^*/h_0) + \log_{10} U_r^* \right\} \dots\dots (5)$$

ここに、 h_0 , a_{H0} は本実験の造波水深 400 cm (実スケール水深 800 m) と振幅であり、 h^* , a_H^* は任意の水深と振幅

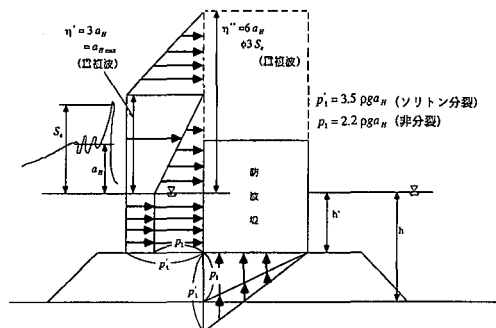


図-13 津波の防波堤波圧算定式

他, 1998)。また, U^* は A/B となる。従って, 上記の式 (4) は, 分散性効果を表す支配パラメータ B の値が小さくなるほどソリトン分裂しにくいこと, 式 (5) は, 分散項に対し非線形項のオーダーが相対的に大きくなるほどソリトン分裂しにくいことを表現している。

4. 津波の波圧分布特性と波圧算定式の提案

図-9 に, 押し波初動正弦津波のソリトン分裂時の波圧波形例を示す。図-9 によれば, ソリトン分裂時には分裂波の最大水位が段波振幅の 2 倍程度まで達するため, 分裂波の波圧値も段波の波圧値の 2 倍程度となっている。また, 静水面より上に位置する p_1 の波圧値は, 静水面下の p_2, p_3 の波圧値よりも小さく, p_2 と p_3 の波圧値はほぼ同程度である。ここで, 防波堤前面壁におけるソリトン分裂波と段波の水位と波圧の振幅を図-10 に示すように定義する。本実験の範囲内では, 概して uh_{max} は防波堤なしの uh の 2 倍, a_{Hmax} は防波堤なしの a_H の 3 倍, eta_{Hmax} は a_{Hmax} の 2 倍の振幅となった。

上記のように定義して, 押し・引き波初動を併記して段波の波圧分布値およびソリトン分裂波の波圧分布値を整理したのが, 図-11 および図-12 である。図-11 によれば, 沖合津波を上記の 3 種類の波形で模擬しても, 段波部分の波圧値と作用高さは合田式 (1973) の長波近似で評価できる。一方, 図-12 によれば, 顕著なソリトン分裂津波では, 合田式による波圧値の 1.6 倍程度の波圧となり, その作用高さは合田式による作用高さの 2 倍程度になる。本研究では, 実験で得られた分裂波波圧の鉛直分布値を包絡するように算定式を作成し, 図-12 中に示す。以上の検討結果を踏まえて, 津波の防波堤波圧算定式を, 図-13 に示すように提案する。ちなみに, 本ソリトン波圧算定式を用いて, 日本海中部地震津波 (1983) により被災した能代火力発電所の建設途中のケーソン断面 III と IV (谷本他, 1984) の安定性を再検討すると, ソリトン分裂していれば津波の第 1 波目で滑動し得る結果となる。

5. 結 論

1) 正弦波と断層モデルによる津波のソリトン分裂発生条件はほぼ同じであるが, 孤立波は押し波初動の正弦波に比べソリトン分裂が生じにくい。

2) 波長・水深比とアーセル数を支配パラメータとして, $1/200 \sim 1/100$ 勾配斜面上での 2 種類のソリトン分裂限界指標を提案した。

3) 津波の段波部分の波圧値と作用高さは合田式の長波近似で評価できるが, 顕著なソリトン分裂津波の波圧値と作用高さはこれをはるかに上回る。この場合を含む波圧算定式を提案した。

本研究を実施するにあたり, (株)シーアールエスの稲葉大介氏, 安川剛史氏, (株)八重州土木技術センターの嶋野三男氏の協力を得た。また, 著者らが開発した津波造波ソースプログラムの大型造波水路への組み込みには (株)テトラの小山裕文氏, 古澤彰範氏の協力を得たことを付記する。

参 考 文 献

- 池野正明・松山昌史・田中寛好 (1998): 無ひずみ実験に基づくソリトン分裂津波の発生条件・防波堤波圧の評価, 電力中央研究所報告, 研究報告 U 98006.
- 岩崎敏夫・首藤伸夫・鈴木義和・栗田 悟 (1978): 孤立性段波のえりわけ距離に関する研究, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 132-136.
- 久保田 博・大橋良弘・高本全徳 (1986): 断面一次元数値解析手法によるソリトン分裂の発生条件の検討, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 66-70.
- 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. 3-29.
- 後藤智明・小川由信 (1982): Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科, 52 p.
- 佐藤良輔 (1989): 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, 390 p.
- 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, 港湾技研資料, No. 470, 299 p.
- 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋 (1984): 1983 年日本海中部地震津波による津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 257-261.
- 鶴谷広一・中野 晋・一戸秀久 (1984): 浅海における津波の変形と遡上に関する実験的研究—1983 年日本海中部地震津波の検討—, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 237-241.
- 松田時彦 (1975): 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地質, 第 2 輯, 第 28 巻, pp. 269-283.
- 野口賢二・佐藤恒司・田中茂信 (1995): 北海道南西沖地震津波の奥尻島南端部における変形機構, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 371-375.
- 野口賢二・佐藤恒司・田中茂信 (1997): 津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模模型実験, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 296-300.
- Goring, D.G. (1979): Tsunamis - the propagation of long waves onto a shelf, Report No. KH-R-38, California Institute of Technology.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971): The displacement field of inclined faults, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 61, pp. 1433-1440.
- Peregrine, D. H. (1967): Long waves on a beach, J. F. M., Vol. 27, Part 4, pp. 815-827.