

日本海中部地震において能代港湾奥水面貯木場に来襲した 津波ソリトン波列の再調査およびソリトン分裂シミュレーション

千田 健一*・岩間 俊二**・三上 勉*・館澤 寛*
菊池 茂*・鈴木 介*・石川 勝章*

1. はじめに

1983年5月26日正午に発生した日本海中部地震では、地震発生から15分～20分後、能代港に津波第1波が来襲し、護岸工事に携わっていた14人が亡くなった。しかし、その第1波の詳細なシミュレーションはなされていない。要因は2つある。

◎要因1 波源の未解明点 (Shuto N)¹⁾

第1波は、到達時間から複断層が存在しなければならぬが、地震波を生じないサイレント・アースクェイクであったため、波源の詳細が不明であること。

◎要因2 験潮所記録の水理フィルター (Shuto N)¹⁾

能代港験潮所潮位記録には、第1波は、記録されなかった。これは、第1波が短周期のソリトン波列となって来襲し、水理フィルターの影響で記録されなかったためである。このため、シミュレーション結果の検証資料が極めて少ない。

本研究の目的は、日本海中部地震において能代港湾奥に到達したソリトン波列を再調査し、シミュレーションにより再現することである。

本論文は、下記の各章より構成される。

第2章 能代港湾奥に到達したソリトン波列の再調査

能代港湾奥に到達したソリトン波列の写真と現地再調査により、ソリトン波列の波長、波高を推定した。

第3章 CIP法による非線形分散長波シミュレーションの誤差制御

筆者が開発中のCIP法による非線形分散長波シミュレーションモデルを用いたソリトン分裂シミュレーションに際し、誤差管理の一環として、孤立波シミュレーションにより、最適格子間隔を検討した。また、ソリトン分裂水理実験を実施し、シミュレーションの精度を検証した。

第4章 能代港湾奥に到達したソリトン波列の再現シミュレーション

ソリトン波列のシミュレーションを行い、第2章の写真判読結果と照合し、その妥当性を示した。

2. 能代港湾奥に到達したソリトン波列の再調査

(1) 判読に用いる写真

写真1は、能代港湾奥水面貯木場の建設省東北地建能代工事事務所付近で撮影されたものである(図1参照)。能代港では、12時15分ごろ第1波が到達した。第2波は、12時30分ごろ到達し、第1波と、第2波では、第2波のほうが大きかった。能代工事事務所は、第2波により床上浸水を生じている。写真1では、同事務所は浸水しておらず、人々が悠然と津波を眺めている。このことから、写真は、津波1波と考えられる。本稿では、写真1を用い、現地再調査結果から、波長と波高を求める。

* 株式会社 防災技術コンサルタント

** 株式会社 防災技術コンサルタント (岩手大学大学院工学研究科 社会人博士課程在学)

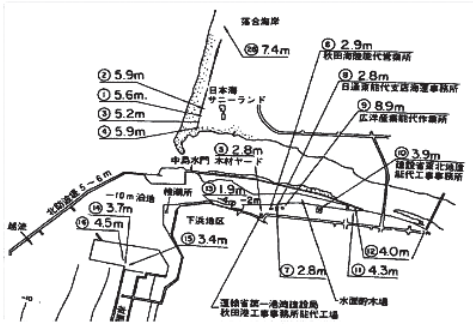


図 1 調査位置図²⁾
建設省東北地建能代工事事務所付近

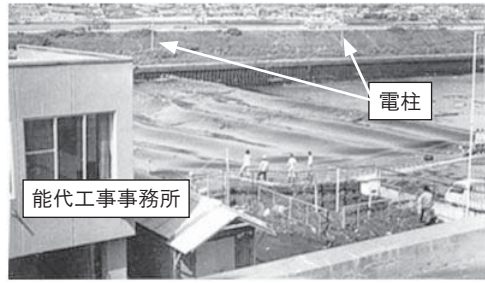


写真 1 能代港奥の水面貯木場に侵入する津波³⁾



写真 2 電柱の間隔 30m

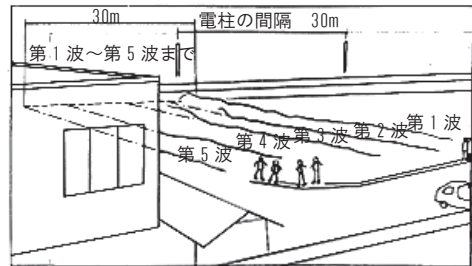


図 2 電柱の間隔による波長の判読 (約 8m)

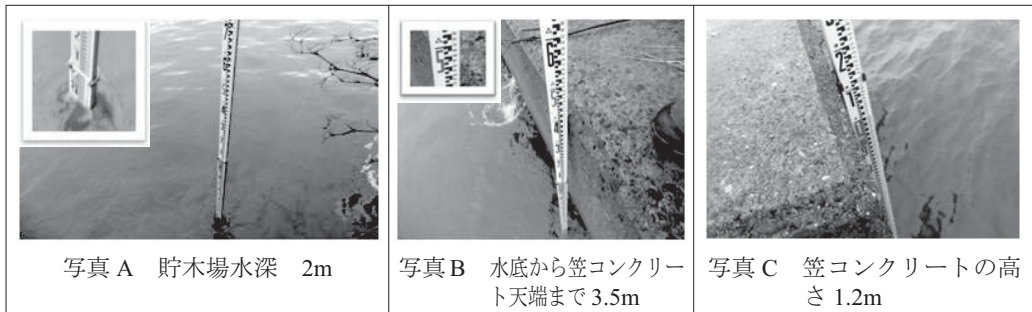


写真 3 現地再調査結果 (構造物計測)

(2) 電柱間隔による波長の判読

写真 1 には、2 本の電柱が撮影されている。建設省東北地建能代工事事務所付近は、現在更地となっている。その対岸の電柱と電柱の間の距離は、現地調査より 30m であった (写真 2)。

写真 1 には 5 波の波峰が撮影されている。図 2 に、写真のトレース図を示す。写真判読に際し、建物の後ろの波を見えている波峰と平行に外挿する。すると、波先端から、5 波目までの距離は、電柱と電柱の間の距離の按

分から、30m である (図 2 参照)。したがって、平均の波長は、 $30\text{m} / 4$ 波より、約 8m となる。

(3) 護岸笠コンクリートと砕波波高による波高判読

1) 現地作工物調査

能代港湾奥水面貯木場の旧建設省東北地方建設局事務所付近の跡地は、現在更地となっている。撮影されたソリトン波列の波高を調べるため、現地再調査の結果を以下に示す。

ア) 貯木場の水深は、2m であった (写真 3 - A)。

イ) 水路底面から笠コン天端までの高さは、
3.5mであった(写真3-B)。

ウ) 笠コンクリートの高さは1.2mであつた
(写真3-C)。

2) 護岸前面の波高判読

静水面の位置は、水面貯木場の材木等の漂
流物から図3③の位置と判読した。

波が到達する前の静水面の矢板護岸の露出
長は、笠コンクリートの高さとの比例按分よ
り、約1.3m(図3④)である。第1波 波
頂の矢板露出長は、写真判読において、笠
コンクリートの高さとの比例按分より、約0.4m
(図3⑤)である。ソリトン第1波の矢板護

岸前面での波高 η (護岸前面)は、下式より、
0.9mである。

$$\eta(\text{護岸前面}) = 1.3[\text{m}](\text{図3④}) - 0.4[\text{m}](\text{図3⑤}) \approx 0.9[\text{m}]$$

3) 水路中央の波高判読

Longet-Higgins⁹⁾ら(1977)水平床上を伝
播する孤立波の碎波条件は、 $H_b \cdot H = 0.827$
である。岩瀬¹⁰⁾もほぼ同じ結果を得ている。
当該地点では、水深が約1.0mであることか
ら、碎波波高は、0.83mとなる。水路中央では、
波は、碎波直前であることから、波高は、 η (水
路中央) $\approx 0.6[\text{m}]$ (=0.5~0.7m)と判断
した。

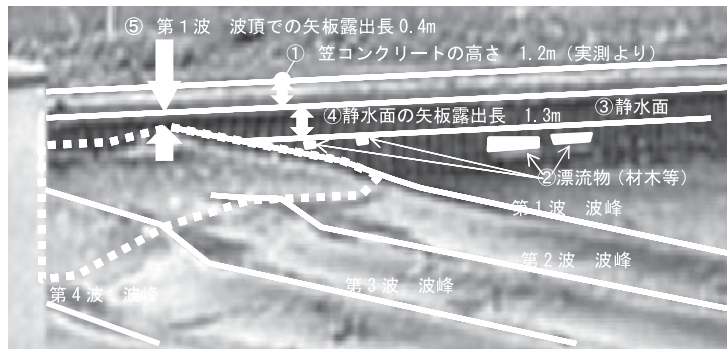
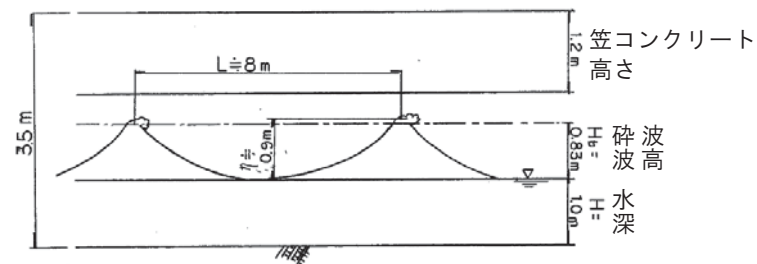
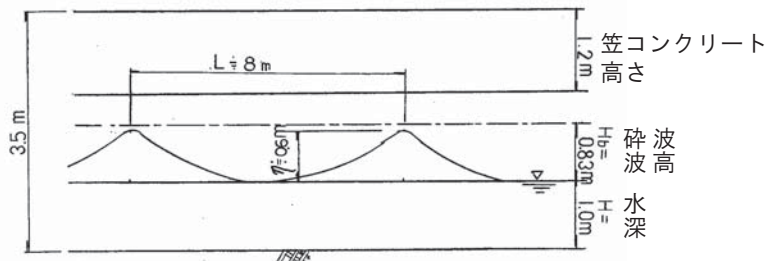


図3 矢板護岸前面におけるソリトン第1波の波高の写真判読



図A 水路中央 波高・波長



図B 水路中央 波高・波長

図4 貯木場におけるソリトン波列の写真判読結果

3. CIP 法による非線形分散長波シミュレーションの誤差制御

(1) 検討概要

津波シミュレーションの世界的標準モデルは、東北大モデルである。筆者は、同モデルを拡張し、非線形分散長波シミュレーションモデルを開発中^{4)~8)}である。同モデルの東北大モデルに対する差異は、移流項差分をCIP法により高精度化したことと分散項を付与したことである。同モデルによるシミュレーション結果、および既往研究との精度の比較は、報告済みであるが、このモデルを用いる際の誤差制御については、検討課題となっていた。本検討では、孤立波のシミュレーションにより、最適な格子間隔について検討した。また、ダムブレイク方式で河川のソリトン分裂時系列データを取得した。そして、実験をシミュレーションで再現し、その精度を検証した。

(2) ソリトン分裂実験

1) 実験装置

実験装置を写真4 図5に示す。

2) 実験結果

海側水位 16cm, 川側水位 8cm としてゲート急開により段波を発生させたところ、段波先端でソリトン分裂発生が確認された。ゲートから河川側 $x = 400\text{cm}$ におけるソリトン波列の第1波~第3波までのスナップショットを写真5に示す。また、図8左に高速ビデオの画像解析により取得した水位時系列を黒丸で示す。画像のサンプリング周波数は30Hzである。水位時系列を孤立波の波速で空間方向に展開した結果を図8右に黒丸で示す。

(3) 誤差制御

1) 空間格子間隔と誤差の関係

当モデルを用い、 $h=5.0\text{m}$ 一定の水路上に、 $H=1.0\text{m}$ の孤立波を30秒間伝播させた。孤立波は、保存波であり、理論上は波形を変えず伝播する。しかし、シミュレーションでは、

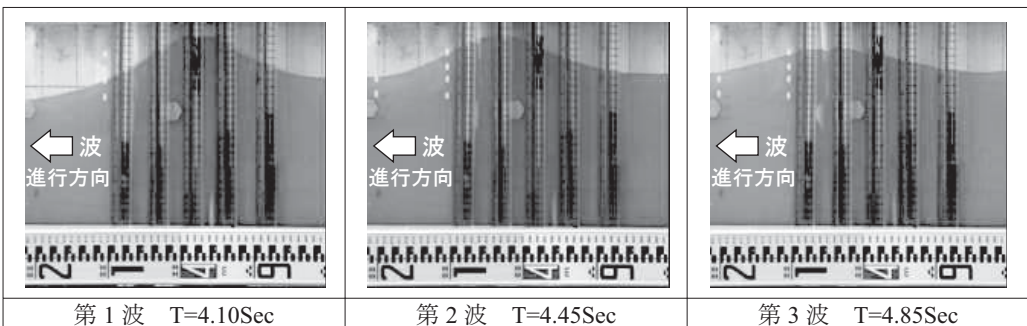
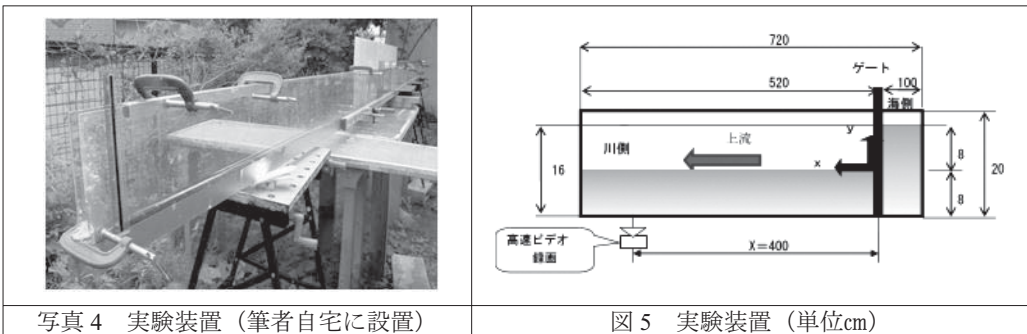


写真5 実験結果 (ソリトン波列_第1波から第3波までのスナップショット)

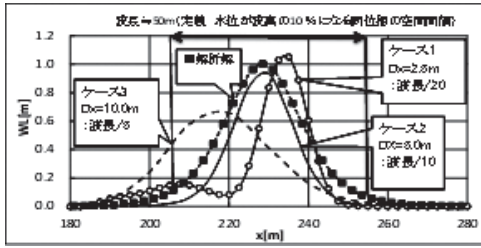


図6 計算開始後30秒後(5波長伝播後)の孤立波の波形の比較

数値誤差の影響で波形は時間とともにひずむ。誤差は、空間格子間隔の影響を受けると予想される。誤差に対する空間格子間隔の影響は、多くの場合、波長との比で議論される。

孤立波の波長は無限大であるが、本研究では、水位変化の大きい部分に着目し、水位が波高の10%となる同位相の間隔を孤立波の波長と定義した。すると、本検討の孤立波の波長は、約50mである(図6)。波長に対する空間格子間隔をケース1 1/20(2.5m)、ケース2 同1/10(5.0m)、ケース3 同1/5(10m)と変化させてシミュレーションを行った。ケース1では、波高が減衰しているが、これは数値逸散性のためと推定される。ケース3

では、波高が若干増幅し、後続波が発生しているが、これは、物理分散性に対し、数値分散性が過大なためと推定される。解析解と比較し、当モデルで最も精度が高いのは、ケース2 空間格子間隔を波長の1/10とした場合である(図6)。同ケースでは、波高・波形・波長ともほぼ解析解と一致した。

(4) ソリトン分裂シミュレーション

(3) 誤差制御の検討結果を基に、空間格子間隔をソリトン第1波の波長の1/10程度の8cmとして、前記実験と同一の水路条件で、ダムブレイク・ソリトン分裂発生シミュレーションを実施した。波長は、図8右図の実験結果より、ソリトン第1波を孤立波と見なして80cmと判読した。シミュレーション結果を図7に示す。

1) 実験によるシミュレーション結果の照査

ゲート(x=0cm)からの距離X=400cmでの実験による水位時系列と、シミュレーションの比較を図8左に示す。また、孤立波の波速を用いて実験の時系列を空間方向に展開した結果とシミュレーションの比較を同図右に示す。

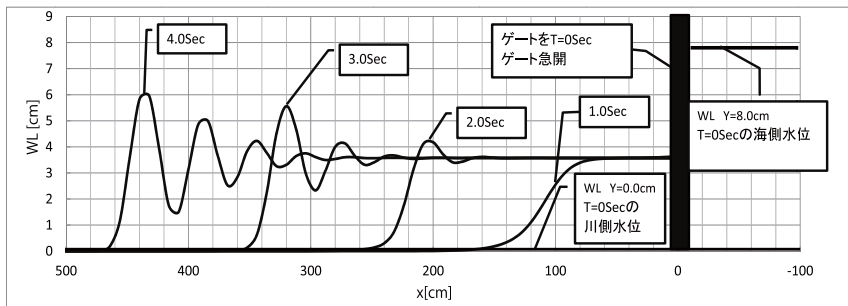


図7 ソリトン分裂発生シミュレーション(水位 空間分布シミュレーション結果 1秒毎)

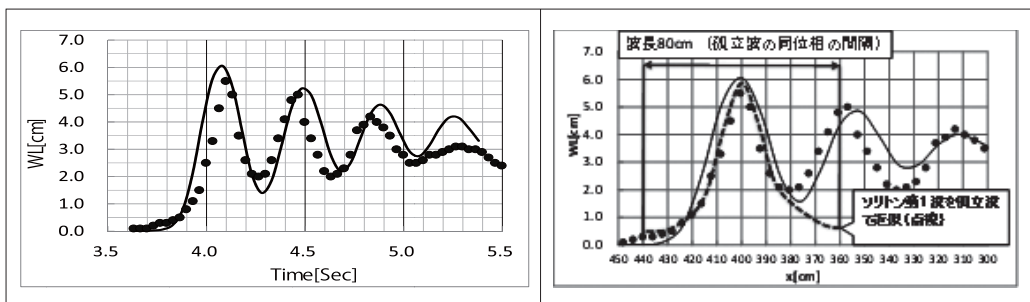


図8 実験(黒丸)とシミュレーション結果(実線)の照合 左図 時系列 右図 空間波形

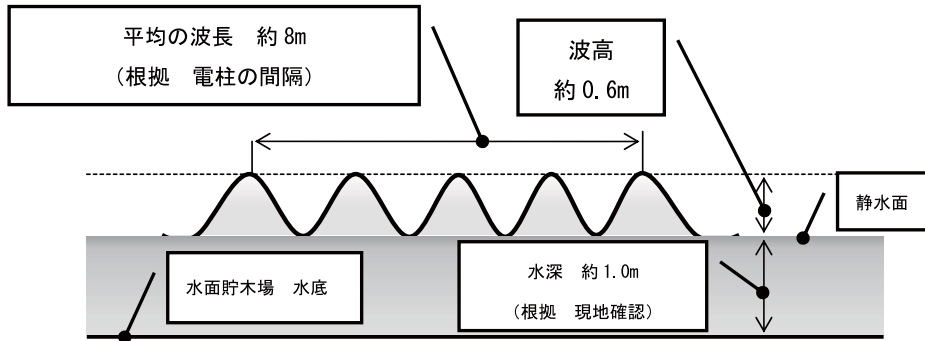


図9 水面貯木場におけるソリトン波列の写真判読結果

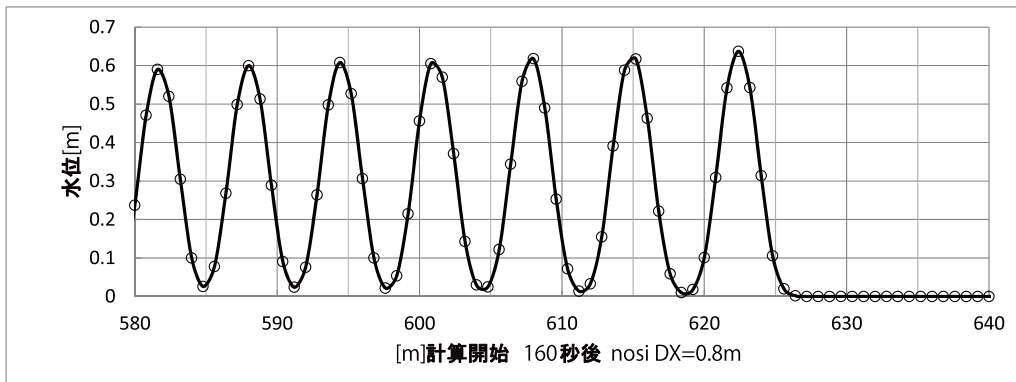


図10 水面貯木場におけるソリトン波列のシミュレーション結果

4. 能代港湾奥に到達したソリトン波列の再現シミュレーション

3 (2) ソリトン分裂実験と同様に、ダムブレイク方式で水面貯木場に来襲した津波のシミュレーションを実施した。ダムブレイクの初期波高は、トライアル計算より、1.3mとした。ダムブレイク発生地点(仮想のゲート位置)からの距離600mにおける水位の空間分布を図10に示す。波高、波長は、図9に示す現地に来襲したソリトン波列の調査結果とほぼ一致した。

5. 結論

(1) 水面貯木場に来襲したソリトン波列の波長、波高

日本海中部地震津波の際、能代港の水面貯木場に来襲した津波ソリトン波列に関し、現

地再調査をおこなった。その結果、波長は約8m、波高は、護岸前面で、約0.9m、水路中央で約0.6m程度と分かった(図4)。

(2) 最適空間格子

筆者が開発したCIP法による非線形分散長波モデルの精度は空間格子間隔の影響を受ける。

孤立波のシミュレーションの結果、当モデルでは、空間格子間隔を波長の1/10程度とした場合、誤差が最小となった(図6)。

(3) 実験によるモデル精度検証

実験と照合した結果、当モデルの精度は良好であった(図8)。

(4) 能代港のソリトン波列再現シミュレーション

当モデルを用いた結果、水面貯木場に来襲したソリトン波列のシミュレーション結果は、ソリトン波列の再調査結果(図9)と実用上十分な精度で一致した(図10)。

【参考文献】

- 1) Shuto N., K. Chida, F. Imamura(1993)
GENERATION MECHANISM OF THE
NIHONKAI CHUBU EQRTHQAKE
TSUNAMI,Proceedings of the IUGG/IOC
International Tsunami Symposium pp9-21
- 2) 港湾技術研究所資料 No470 日本海中部
地震津波の実態と二・三の考察 1983.
11 P106
- 3) 「昭和 58 年日本海中部地震写真報告集昭
和 59 年 3 月」
- 4) 千田 (2009) 一次元非線形分散波の方
程式を用いた CIP 法による河川を遡上
する津波の数値計算
平成 20 年度 土木学会 東北支部研究
発表会 II - 48 P189-19 (CD_R)
- 5) 千田 岩間 三上 鈴木 (2009) 二次
元非線形分散波の方程式を用いた CIP 法
による河川を遡上する津波の数値計算
平成 20 年度 土木学会 東北支部研究
発表会 II - 49 P191-19 (CD_R)
- 6) 千田 岩間 三上 舘澤 津波ソリトン
波列の陸上遡上シミュレーションの新モ
デルの提案 (2013)
平成 24 年度 土木学会 東北支部研究
発表会 II - 42 (CD_R)
- 7) 千田 岩間 三上 舘澤 鈴木 (2013)
非線形分散長波理論を用いた
津波ソリトン分裂・河川遡上・マッハ反
射シミュレーション
東北大学 津波工学研究報告 第 30 号
P105 ~ P110
- 8) 千田 岩間 三上 (2014) 河川を遡上
する津波のソリトン分裂実験およびシ
ミュレーション
平成 25 年度 土木学会 東北支部研究
発表会 II - 54 (CD_R)
- 9) Longuet-Higgins,M.S.and Fenton,J.D(1974)
On the mass,momentum,energy and cricu-
lation of a solitary wave,Proc..Royal Soc.
london,A333,pp1-13
- 10) 岩瀬 (2005) 津波発生域から沿岸域ま
での分散効果を取り入れた数値モデルの
研究 東北大学博士論文 (工学研究科土
木工学専攻) P107