

2011 津波にて岩手県久慈港に來襲した津波ソリトン波列の現地再調査及び再現シミュレーション

千田 健一*

1. はじめに

津波ソリトン波列の周期・波高観測結果は極めて少ない。要因は沿岸の潮位計は水理フィルターの影響により短周期成分を記録できないことにある (N.Shuto,F.Imamura)¹⁾。2011 津波の際、岩手県久慈市久慈港では津波第 1 波が短周期のソリトン波列となって来襲²⁾した。本研究は現地再調査と、地上から撮影されたビデオ³⁾の画像解析より、津波ソリトン波列の波高・周期・波長を解析し、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⁴⁾により再現する。

2. 現地再調査及びビデオ画像解析

現地再調査は、下記要員にて複数回実施した。

調査主任 千田健一 (防災技術コンサルタント)

調査補助 千田聖 (盛岡市)

調査対象地点は、国土交通省東北地方整備局 釜石港湾事務所 久慈出張所職員により、津波第 1 波がビデオ撮影³⁾された久慈港諏訪下地区である (写真 -1 及び図 -1 参照)。前記現地構造物再調査にて下記 2 点を確認した。

- 1) 写真 -1 の津波第 1 波写真上の灯台は、諏訪下防波堤灯台である。
- 2) 諏訪下防波堤の天端は、最も標高が低い地点で海面から 3m、最も標高が高い地点で 4m である。

諏訪下防波堤付近の津波第 1 波の波高を把握するため写真に撮影されている諏訪下防波堤灯台の高さを現地確認した。結果を写真 -2 に示す。

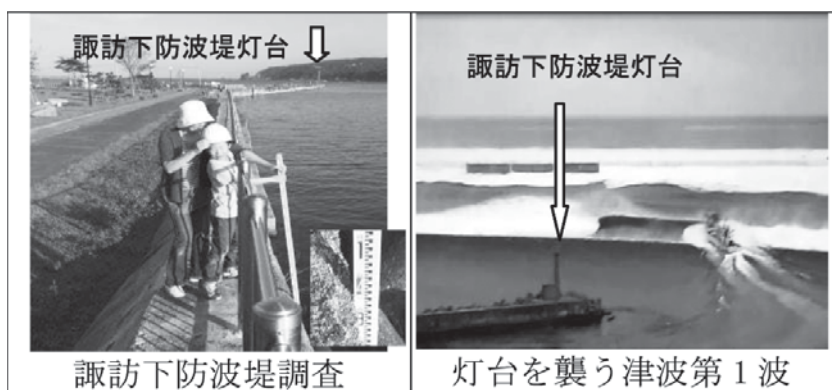


写真 - 1 諏訪下防波堤付近調査状況 及び津波第 1 波³⁾

*株式会社 防災技術コンサルタント



図-1 久慈港深浅図およびビデオ撮影地点(○番は引用写真と関連)

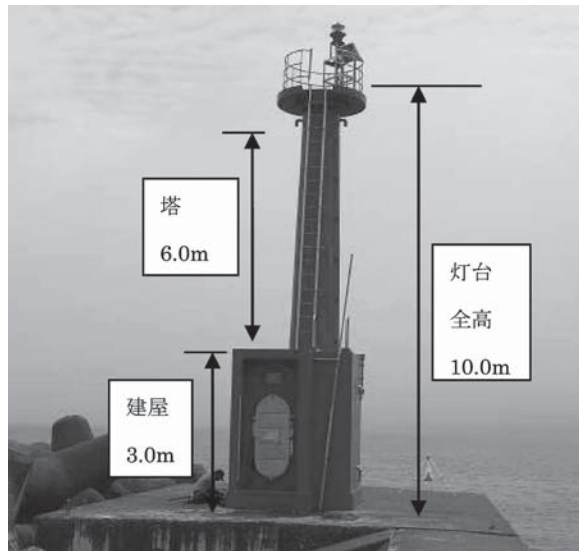


写真-2 諏訪下防波堤灯台の寸法

上記現地再調査を基に、ビデオ画像を解析する。写真-3は、諏訪公園から北側 牛島方向を望んでいる。北側 防波堤沖で津波ソリトン第1波が崩れ巻き波碎波している。その背後にソリトン第2波の白波が見える。海図より碎波地点の水深 h は約 15m (図-1 ①) である。孤立波の碎波限界波高は、 $0.8h$ 程度であるので、碎波直前の波高 $H_b = 0.8h = 0.8 \times 15 \approx 12\text{m}$ と推定される。

写真-4では、津波第1波が碎波段波となっ

て防波堤に衝突・越波しつつある。その後も白波が来襲しており、ソリトン波列が後続していることがわかる。(図-1 ②)

写真-5は、諏訪下防波堤灯台に津波第1波が衝突する 10 秒前の状況である。津波ソリトン第1波は、碎波寸前なのに対し、第2波は碎波を開始している。海図から、ソリトン碎波地点の水深は、約 10m (図-1 ③) である。碎波波高は、孤立波の場合水深の 0.8 倍程度であるから、これら2つのソリトン

の波高は、 $10 \times 0.8 \div 8\text{m}$ と推定される。湾外に避難しようとする漁船が津波第1波に乗り上げており、その後ろにソリトン分裂した津波第2波が迫っている。ビデオ判読により、この漁船の振幅周期から、津波ソリトン第1波と第2波の周期 t は、波峰から波峰まで $t \div 6$ 秒であった。この地点の水深は海図より 10m (図-1③)である。波速 C は孤立波の波速より

$$c = \sqrt{gh} \left(1 + \frac{H}{2h} \right) = \sqrt{9.8 \times 10} \left(1 + \frac{8}{2 \times 10} \right)$$

$C \div 14\text{m/s}$ である。このことから、波長 $L = c \times t = 14 \times 6 \div 85\text{m}$ である。

写真-6は、諏訪下防波堤灯台に第1波が衝突した瞬間である。この時の波高を求めるため実施した諏訪下防波堤の現地確認調査よ

り、灯台建屋の高さは、 3m (写真-2)である。また、津波來襲前の水面は、写真上で建屋のスケール按分より、堤防天端- 2m の標高にある。諏訪下堤防での津波第1波の波高は、構造物との比較按分より 5m である。なお、同波高推定値は、灯台位置の水深が 6m (図-1④)であり、砕波波高が 5m 程度となることも調和している。

写真-7は、上記ビデオとは別の市民によるインターネット投稿写真である。少なくとも3波以上の短周期波が、砕波しながら玉突き衝突状に來襲している。水面から護岸天端までの高さは、現地確認調査から、最小 3m 最大 4m である (写真-1)。津波は、護岸を乗り越えていることから波高は $5 \sim 6\text{m}$ 程度と分かる。

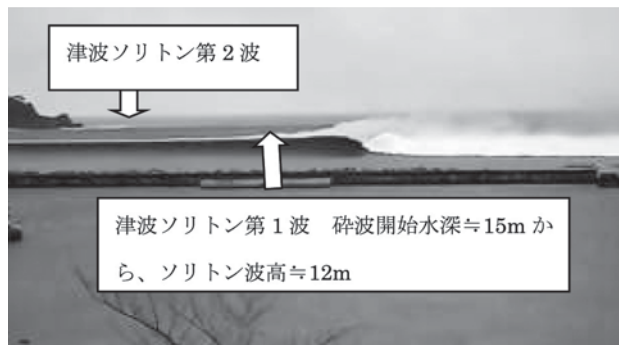


写真-3 諏訪下外防波堤沖(図-1①)

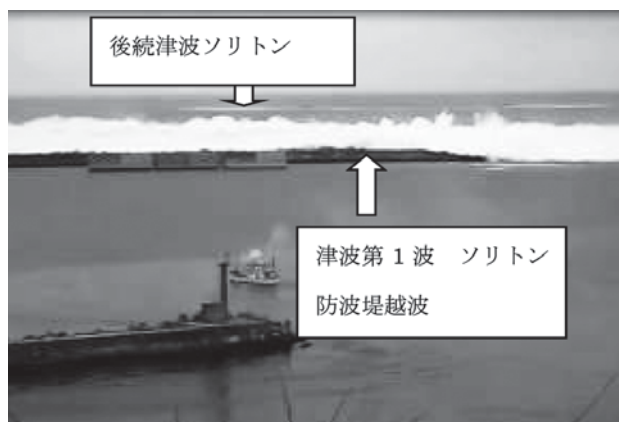


写真-4 諏訪下沖防波堤にての津波第1波(図-1②)

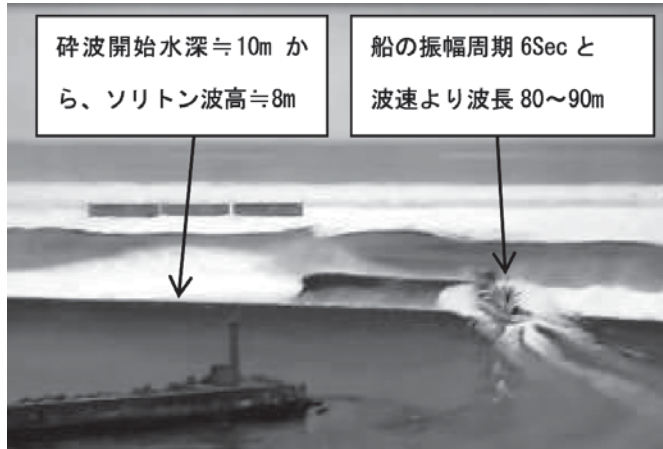


写真-5 諏訪下防波堤灯台沖 (図-1 ③)

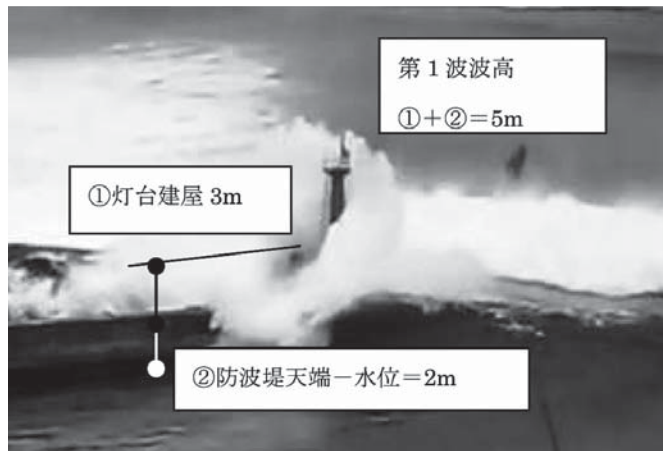


写真-6 諏訪下防波堤灯台を望む(図-1 ④)

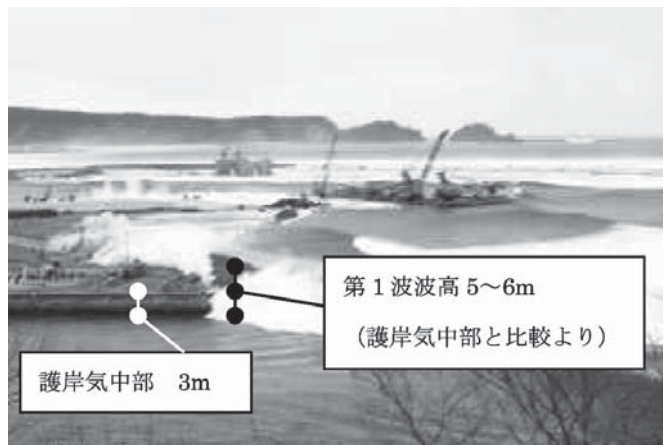


写真-7 諏訪下地区に來襲する短周期波列(図-1 ⑤)

調査結果要旨を図-2に要約する。

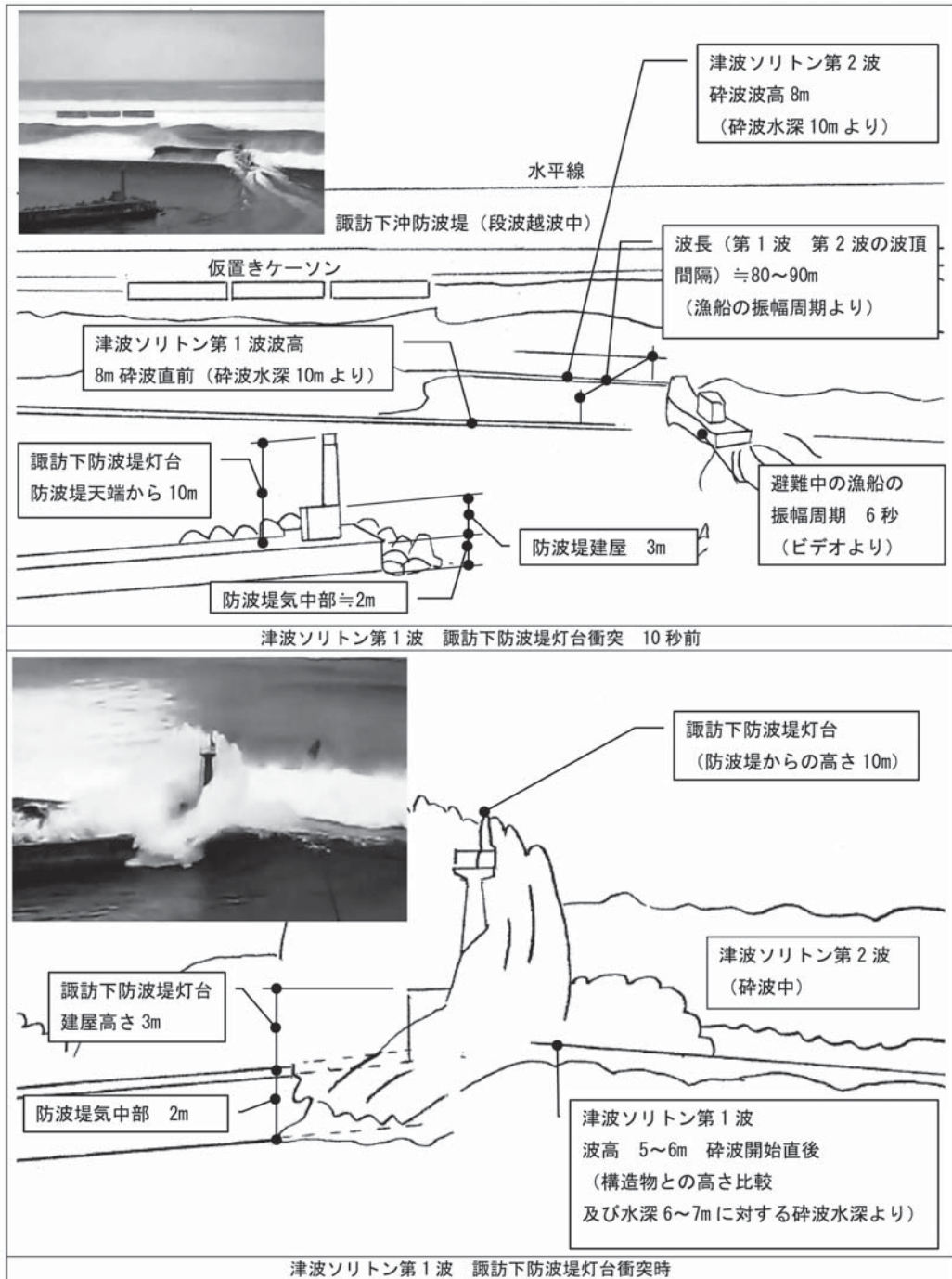


図-2 久慈港 諏訪下地区 津波ソリトン第1波 短周期波列の波高・周期・波長の再調査結果

3. ソリトン波列の再現シミュレーション

3.1 検討概要

2011 東日本大震災津波の際、沖合水深 125m 地点では、岩手北部沖 GPS 波浪計が津波水位時系列を詳細に記録した (図-3 参照)。同水位時系列を入射境界条件とし、筆者が開発中の CIP 法を用いた津波ソリトン分裂シミュレーションプログラム⁴⁾ (以下 CIP 法と呼ぶ) により、前記現地調査より知れるソリトン波列を再現する。

3.2 シミュレーション条件

(1) 計算手法

支配方程式は、下記 1 次元非線形分散長波方程式である。運動方程式の移流項を CIP 法、その他の項をスタックードリーブロックで解く。CIP 法を用いるため、運動方程式は非保存系となる。本研究では、摩擦項は取り込んでいるが砕波項は無視した。詳細は、別紙⁴⁾に譲る。

①連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0$$

②運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + U \frac{\partial M}{\partial x} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & = \frac{D^2}{3} \frac{\partial^3 M}{\partial t \partial x^2} - \left(\frac{gn^2}{D^{1/3}} \right) \frac{M|M|}{D^2} \end{aligned}$$

$$D = n + h$$

ここに、 η : 水位, t : 時刻, M : 流量フラックス, x : 空間座標, U : 流速 (= M/D), g : 重力加速度, n : マンニング粗度係数。

(2) 入力波

入力波形は、岩手県北部沖 GPS 波浪計が捉えた周期 4 分、波高 4m の波を計算領域外側から強制入力した。

(3) 地形

地形は、久慈湾内から真東 25 km の水深 125m (GPS 津波計の設置水深) まで 1 次元で登録した。

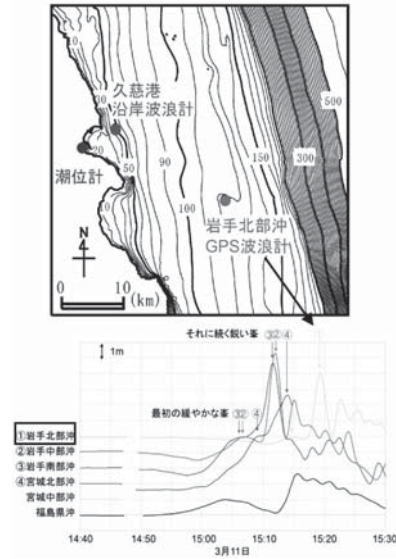


図-3 GPS 波浪計が捉えた津波

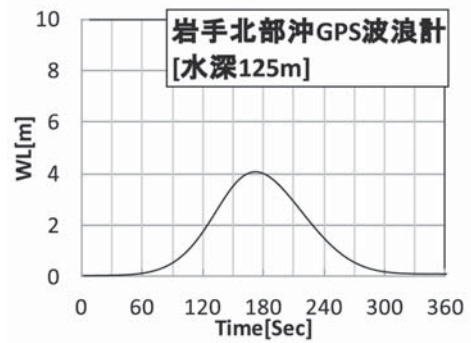


図-4 入力波形

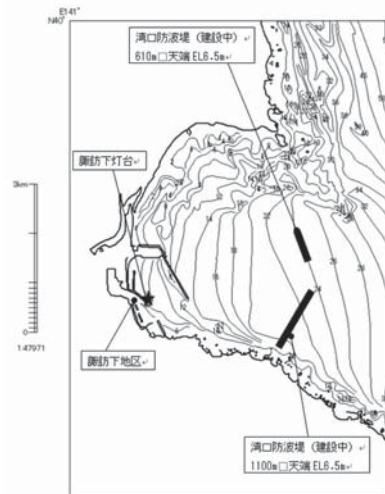


図-5 久慈湾海底地形

3.3 空間時間波形のシミュレーション結果

波源から沿岸までのシミュレーション結果を図-6～8に示す。

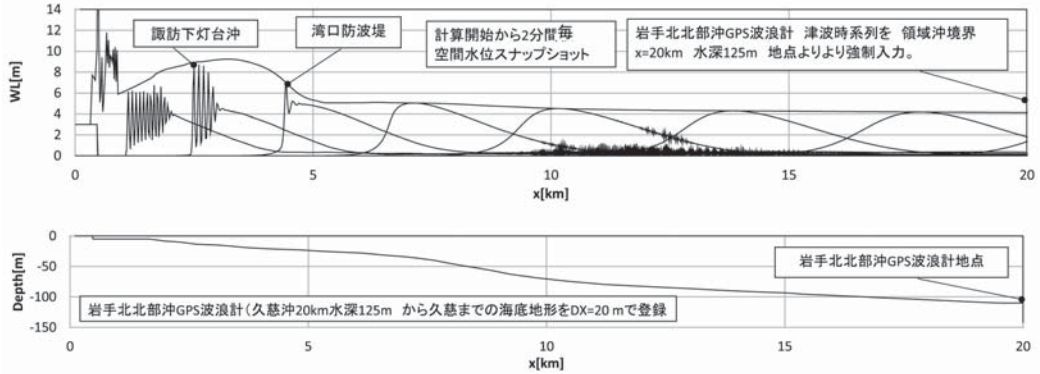


図-6 波源から沿岸までの水位空間分布スナップショット

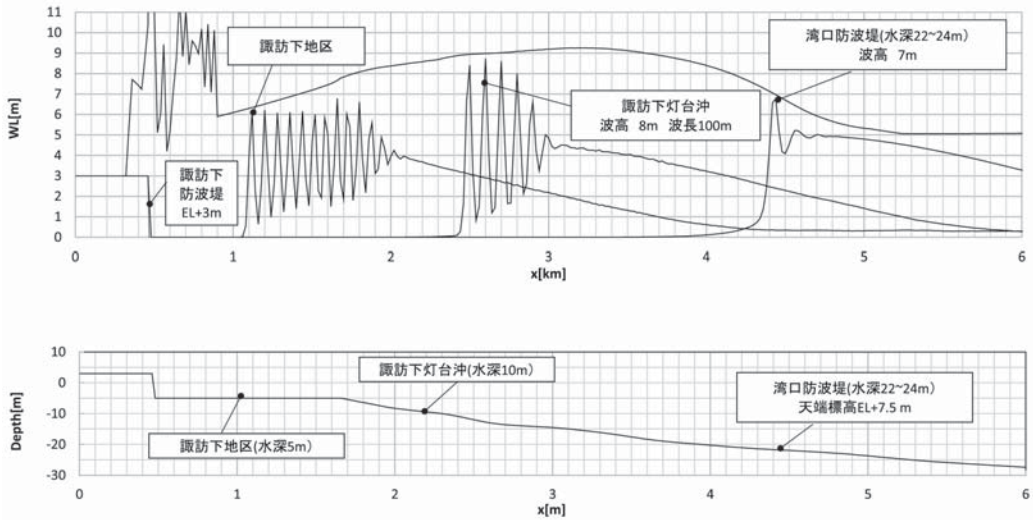


図-7 沿岸の水位空間分布スナップショット

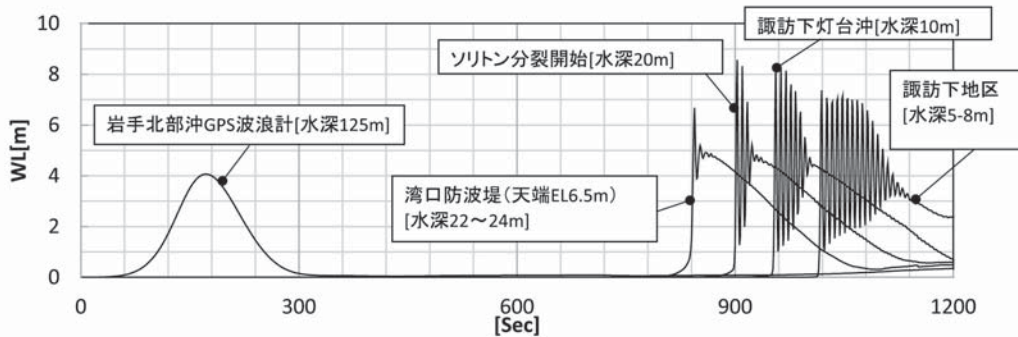


図-8 波源から沿岸までの代表地点水位時系列

3.4 現地調査およびビデオ画像解析結果との照合

湾口防波堤（当時建設中）の設置水深は、22～24m、天端標高は、EL6.5mである。自衛隊撮影のビデオより津波は天端を若干超えているので、波高はEL7m程度と判断できる（写真-8）。シミュレーションでは、津波はソリトン分裂の兆しがある（図-9）。波高は、ビデオ解析結果とほぼ一致した。



写真-8 湾口防波堤

自衛隊のビデオでは、沖防波堤を越え、水深が20m程度となるとソリトン分裂が顕著となり、波高が増大する（写真-9）。シミュレーション結果でも波高増大、ソリトン分裂が再現された（図-10）。

諏訪下灯台沖では、ビデオ撮影された漁船の上下から、ソリトン波列の周期は6秒、波高8m程度である（写真-10）。シミュレーション結果は、それとほぼ一致した（図-11）。

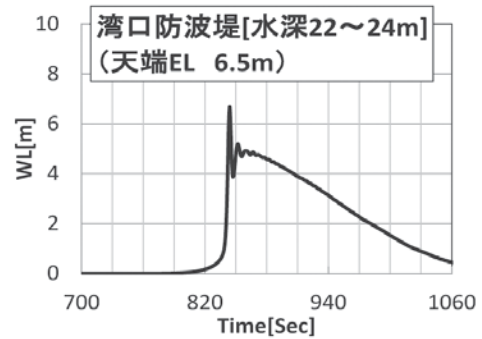


図-9 水位時系列 湾口防波堤



写真-9 諏訪下地区沖

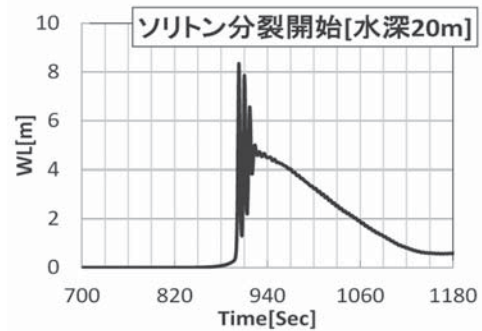


図-10 水位時系列 諏訪下地区沖

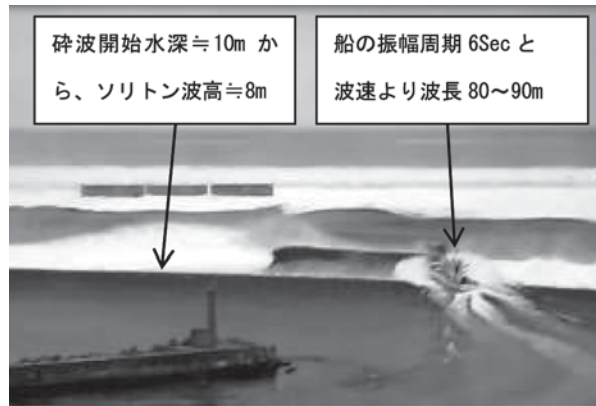


写真-10 諏訪下防波堤灯台沖(図-1③)【写真-5再掲】

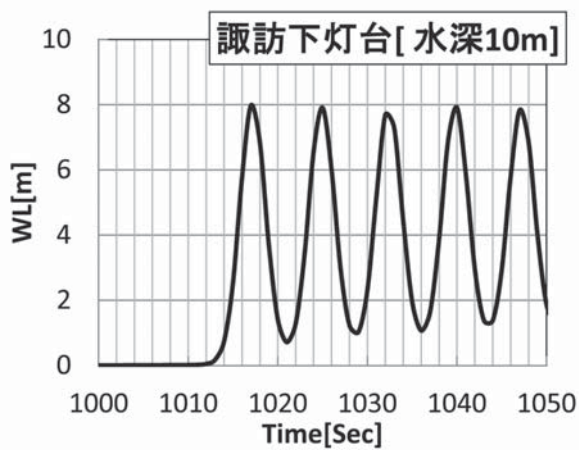


図-11 水位時系列 諏訪下防波堤沖

4. まとめ

今後の課題は砕波の考慮である。

【参考文献】

- 1) N.Shuto,K.Chida,F.Imamura,1994.
Generation Mechanism of the first wave of the
1983 Nihonkai-Chubu earthquake tsunami.
Tsunami : Progress in prediction, Disaster
prevention and warning, by N.Shuto.et.al.pp37-
53.
- 2) 港湾空港技術研究所資料 No1231 2011

「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」
P51

- 3) 国土交通省東北地方整備局 釜石港湾事
務所 久慈出張所 インターネット公開ビ
デオ 例えば Jjicom 例えば「港を飲
み込む大津波＝出港した漁船を押し寄せ
る津波が翻弄」
- 4) 千田健一(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 p.189-190(CDR)