

無ひずみ模型を用いた係留浮体の津波による 3次元非線形挙動特性

池野正明*・田中寛好**・松山昌史***

1. はじめに

1983年日本海中部地震津波の際には、津波が著しく段波状になりソリトン分裂を生じたことが報告されている(谷本ら, 1983)。この際には、周期10分程度の津波本体の上に周期10秒程度のソリトン分裂波が重畳することにより津波の最高水位が増大し被害を顕著にさせたものと推察される。また、浅海域で生じたソリトン分裂波が汀線で反射し岸から沖へ伝播したため、北の県境近くの岩崎の沖合いを航行中の漁船の船上では沖からの入射波は全く感知されず、突然岸から波の群れが襲来し大きく揺れたとの報告もある(首藤, 1984)。これは、ソリトン分裂波の周期と船体運動の固有周期とが近いため、共振運動を生じたものと推察される。また当時、能代港の北・南防波堤や発電所護岸が建設中で、各種作業台船、吊起重機船、ガット船等が作業中であったが、これらの回転運動等の固有周期がソリトン分裂波の周期と近いため、同様に共振運動した可能性が高い(東北大学・五洋建設編, 1984)。上記のような非線形波の分裂現象と浮体の有限振幅運動を考慮できる3次元動揺解析法の開発が望まれるが、今のところ皆無である。

そこで、本研究では、大型造波水路を用いた縮尺1/150の無ひずみ模型実験により、まず外郭防波堤の無い係留浮体の3次元津波挙動特性を検討しソリトン分裂津波による係留浮体の共振特性を明かにする。つぎに、開口部を有する外郭防波堤に囲まれた水域内に係留された浮体を対象に津波挙動特性を検討し開口幅と流入流速・水点・動揺特性の関係を明かにする。

2. 実験方法および実験条件

(1) 津波の造波方法

a) 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 $a_{10}=1\sim 2\text{ cm}$ (実スケール換算で $1.5\sim 3\text{ m}$)、周期 $T=20\sim 100\text{ s}$ (実スケール換算で $4\sim 20$

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。

b) 孤立波を用いる方法: 沖での波高 $H=2\sim 4\text{ cm}$ (実スケール換算で $3\sim 6\text{ m}$)の孤立波を造波する。

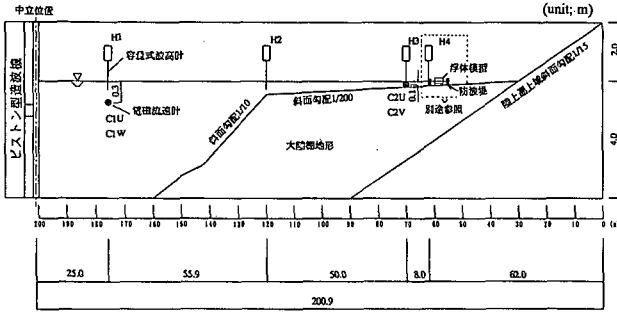
c) 断層モデルを用いた数値計算により求めた沖合い津波を入力する方法: 断層モデルを用いた数値計算法として、本研究では、平面2次元を対象とした非線形長波理論に基づく方程式(後藤・小川, 1982)を用いる。断層モデルとしては、プレートの沈み込み帯で発生する可能性のあるマグニチュード8クラスの低角逆断層を仮定し、沈降域が陸側に位置するものとする(池野ら, 1998)。この断層パラメータを基に、海底地盤の変動量を, Mansinha・Smylie (1971)の方法により算出しその平面分布を初期水位として入力した。以上の方法により計算した水深600 m (1/150縮尺で造波水深4 mに対応)の地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1/150縮尺に換算して実験に使用した。

(2) 係留浮体の動揺実験

本実験で用いる大陸棚海底地形として、図-1に示すように、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。図-2に示すように、大陸棚上の水深16 cm(実スケールで24 m)の地点に防波堤開口部、その後340 cm(510 m)の地点に直立防波堤を設置し、幅340 cmの造波水路の両側方壁と合わせて長さ340 cm、幅340 cmの半閉鎖水域を作成し、その中央に1/150縮尺の箱型浮体を設置した。表-1に模型浮体の諸元を示す。防波堤開口部の幅を67 cm(100 m)、100 cm(150 m)、133 cm(200 m)および前面防波堤なしの4種類に変化させた。浮体の前面と背後に防波堤が無い場合での実験も実施した。

係留方式は、ユニバーサルジョイントを有するドルフィンリンク型係留装置4台による2辺水平係留とし、防弦材剛性を模擬したコイルバネを係留装置1台につき2個配置した。バネ定数は3種類に変化させた。本実験条件における模型浮体の運動固有周期を伊藤・千葉(1972)の近似理論を用いて求めると、表-2のようになる。

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



図一 実験に用いた大陸棚地形と浮体模型および計測器の配置

(3) 浮体の動揺量の計測およびデータ解析方法

浮体の動揺量の計測には、6台のレーザ変位計を用いた。浮体6箇所の変位量を同時計測し剛体として座標変換することにより重心位置における6自由運動及び任意点の変位量を算出した(池野, 1992)。また、図-2に示すように、容量式波高計と水平2成分用電磁流速計を設置し浮体に作用する津波の水位と流速を浮体の3次元運動と同時計測した。1チャンネル当たり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. 実験結果および考察

(1) 防波堤が無い場合の各種津波による動揺特性

図-3(b)(c)は、押し波初動の正弦津波が大陸棚上で著しく段波状に発達し、ソリトン分裂が発生し始める地点に係留浮体を設置した場合の浮体の重心位置における6自由度運動の代表例である。図-3(a)が浮体に作用する直前の津波の水位とC3地点における岸沖流速 U (岸向きが正)、水路奥行き(沿岸)流速 V (x 軸正方向が正)に対応する。図-3(a)に注目すると、段波状に発達した周期20sの津波本体の先端部に周期1s程度のソリトン分裂波が数波確認できる。この津波外力に対応して、まず浮体の水平運動 X_2 に注目すると、周期20sの津波本体には反応せず、周期1s程度のソリトン分裂波に敏感に反応して大きな揺れを生じている。これは、ソリトン分裂波の周期に係留バネの剛性によって決まる水平運動の固有周期1sに非常に近いため、共振を起こしているものと推察される。これに対し、鉛直運動 X_3 では水位波形とほぼ同様の運動波形を生じている。また、岸沖方向の回転運動 X_4 に注目すると、やはり周期20sの津波本体には反応せず、ソリトン分裂波に反応して大きな揺れを生じている。

つぎに、図-4(b)(c)は、引き波初動の正弦津波が大陸棚上で著しく段波状に発達し、ソリトン分裂が発生し始める地点に係留浮体を設置した場合の浮体の重心位置における6自由度運動の代表例である。図-4(a)が浮体に作用する直前の津波の水位とC3地点における岸沖・

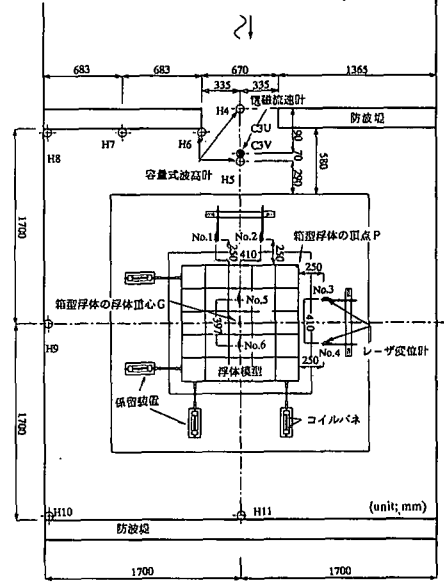
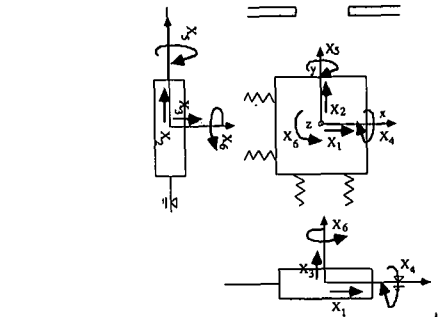


図-2 防波堤・浮体模型と計測器の取り付け位置と6自由度運動(開口部幅0.67mの場合)

表-1 模型浮体の諸元

項目	模型	想定実機
寸法(長さ×幅×喫水)	102×102×9.1(cm)	153×153×13.6(m)
全重量	94.6 kgf	3.2×10 ⁶ tf
静水面上の重心高さ	8.5 cm	12.8 m
重心回りの慣性モーメント	I_x	9.00×10 ⁴ kgf cm ² / 6.83×10 ⁶ tf m ²
	I_y	9.00×10 ⁴ kgf cm ² / 6.83×10 ⁶ tf m ²
	I_z	1.61×10 ⁵ kgf cm ² / 1.22×10 ⁷ tf m ²
係留装置1基当たりのバネ定数	1.8 kgf/cm	4×10 ⁶ tf/m (設計案)
	0.6 kgf/cm	1.3×10 ⁶ tf/m
	0.05 kgf/cm	1.1×10 ⁶ tf/m

表-2 係留浮体の固有周期

固有周期(sec)	surge, sway	heave	roll, pitch	yaw
バネ定数 $K=1.8$ kgf/cm	1.0	1.7	1.1	0.8
バネ定数 $K=0.6$ kgf/cm	1.8	1.7	1.1	1.3
バネ定数 $K=0.05$ kgf/cm	6.2	1.7	1.1	4.5

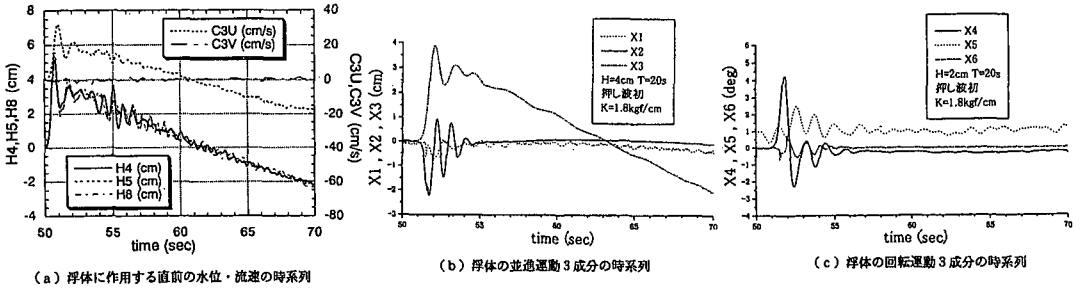


図-3 押し波初動の正弦津波がソリトン分裂を発生し始める地点における水位・流速および浮体の重心位置における6自由度運動の時系列 (係留バネ定数 $K=1.8 \text{ kgf/cm}$)

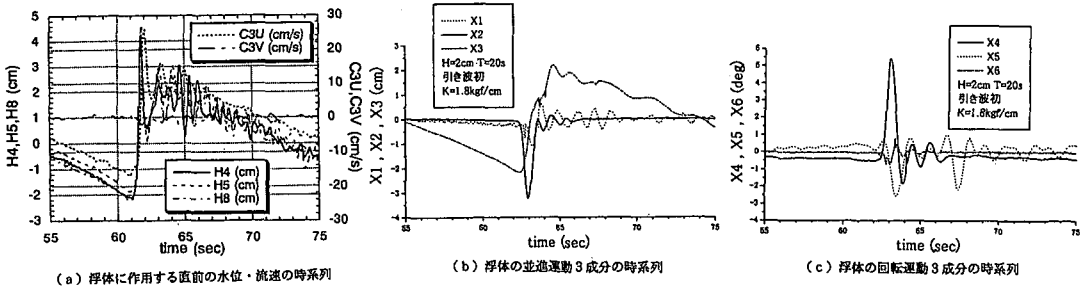


図-4 引き波初動の正弦津波がソリトン分裂を発生し始める地点における水位・流速および浮体の重心位置での6自由度運動の時系列 (係留バネ定数 $K=1.8 \text{ kgf/cm}$)

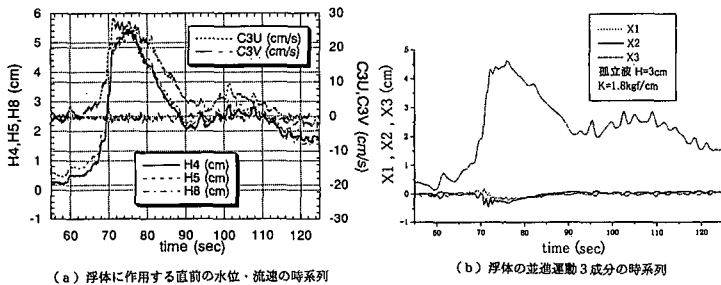


図-5 孤立波津波が前傾して段波になった地点における水位・流速および浮体運動の時系列 (係留バネ定数 $K=1.8 \text{ kgf/cm}$)

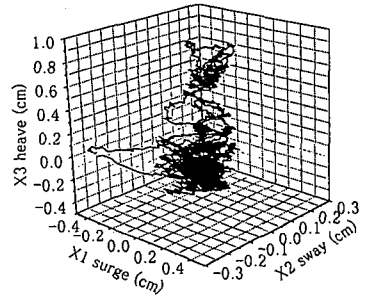


図-7 M8断層モデルによる津波作用時の係留浮体の重心位置Gの3次元運動の履歴 (係留バネ定数 $K=1.8 \text{ kgf/cm}$)

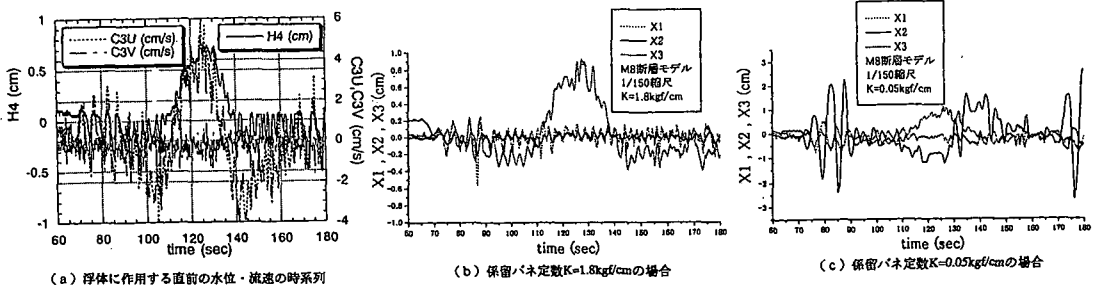


図-6 M8断層モデルによる津波が浮体に作用する直前の地点における水位・流速および浮体並進運動の時系列 (2種類の係留バネ定数の比較)

沿岸流速 U , V に対応する。まず図-4(a)に注目すると、発達した引き波の直後に来襲する段波津波本体の先端部に、押し波初動時と同様に周期1s程度のソリトン分裂波が数波確認できる。つぎに、浮体の水平運動 X_2 に注目すると、初めの引き波に追従した運動は生じておらず、引き波の直後に来襲する段波本体に押されて運動が生じ始めソリトン分裂波の周期1sで振動している。これに対し、鉛直運動 X_3 では、押し波初動時と同様に水位波形とほぼ同様の運動波形を生じている。また、岸沖方向の回転運動 X_4 に注目すると、やはり初めの引き波に追従した運動は生じておらず、引き波の直後に来襲する段波本体に押されて運動が生じ始めソリトン分裂波の周期で大きな揺れを生じている。

図-5(b)は、孤立波津波が大陸棚上で前傾して段波状になった地点に係留浮体を設置した場合の浮体重心の並進運動3成分の代表例である。図-5(a)が浮体に作用する直前の津波の水位と岸沖・沿岸流速に対応する。図(a)に注目すると、前傾して段波状になった孤立波本体の上に周期5s程度の高次の短周期成分(孤立波本体に比べ短周期という意味)が確認できる。これは、沖での造波地点で津波本体に付随して発生した高次の短周期成分が浅水変形に伴い増幅されているものと推察される。また、孤立波本体の水面変動の後方部に水位上昇による盛り上がりが見られる。これは、沖で孤立波造波時に、造波板を押し波初動で押し出して止めた際に生じた水面擾乱が浅水変形に伴い増幅されているものと推察される。この津波外力に対応して、まず浮体の水平運動 X_2 に注目すると、孤立波本体には顕著に反応せず揺れは小さい。これに対し、鉛直運動 X_3 では、水位波形とほぼ同様の運動波形を生じている。

図-6(b)(c)は、M8断層モデルによる津波が大陸棚上での浅水変形により増幅し、係留バネ定数の異なる2種類の浮体に作用する場合の重心位置における並進運動3成分の代表例である。図-6(a)が浮体に作用する直前の津波の水位とC3地点における岸沖・沿岸流速に対応する。図-6(a)に注目すると、この津波は引き波初動で周期が120s程度である。また、沖での造波地点で津波本体に付随して発生した周期6s程度の高次の短周期成分が浅水変形により優位に増幅されている。

まず、バネ定数が $K=1.8 \text{ kgf/cm}$ の場合に注目すると、この津波外力に対応して、まず鉛直運動 X_3 では水位波形とほぼ同様の運動波形を生じているが、これ以外の運動は小さい。これに対し、バネ定数が $K=0.05 \text{ kgf/cm}$ の場合に注目すると、浅水変形により増幅された高次の短周期成分に反応して水平運動 X_2 が大きくなり周期6s程度で振動している。これは、高次の短周期成分の周期に係留バネの剛性によって決まる水平運動の固有周期

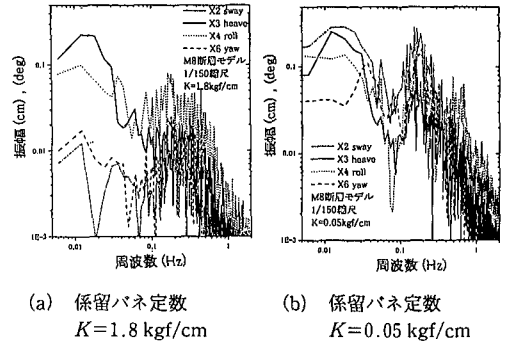
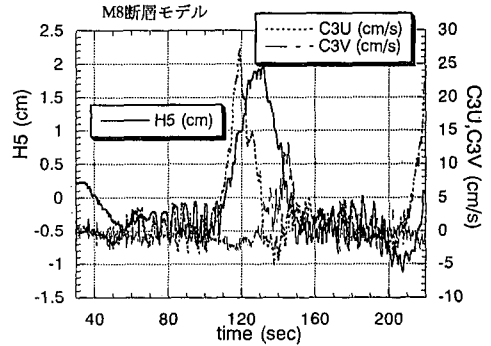
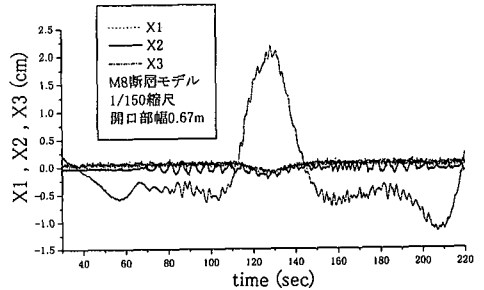


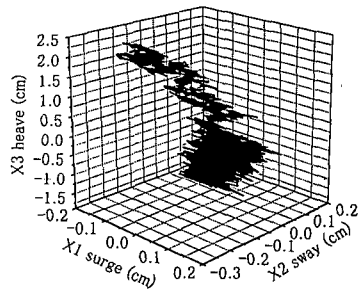
図-8 M8断層モデルによる津波作用時の係留浮体運動の周波数別応答振幅



(a) 浮体に作用する直前の水位・流速の時系列



(b) 浮体の並進運動3成分の時系列



(c) 重心位置Gの3次元運動の履歴

図-9 開口部幅0.67mの場合の水位・流速および浮体運動の時系列

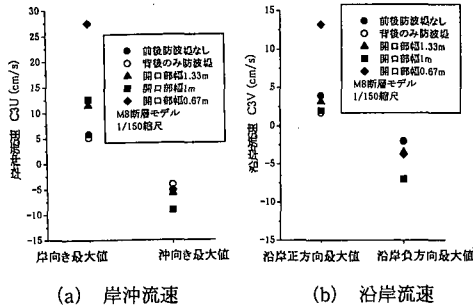


図-10 各ケースに対する岸沖・沿岸流速の最大値

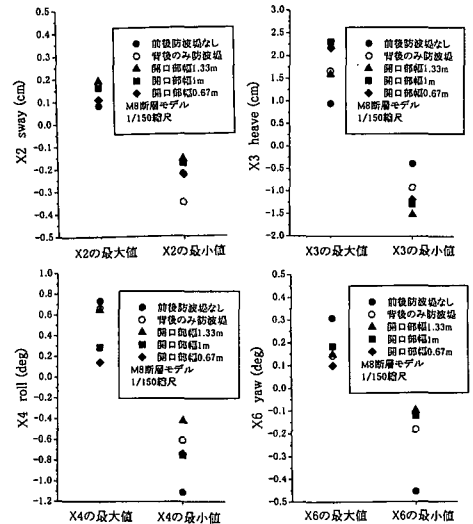


図-11 各ケースに対する浮体の6自由度運動の最大・最小値の代表例

6.2 s に非常に近いため、共振を起こしているものと推察される。鉛直運動 X_3 は両者とも同様である。図-7 に係留浮体の重心位置 G の3次元運動の履歴例を示す。

図-8(a)(b) は、先に出力した上記2種類の係留バネ定数に対応する運動波形をFFT解析した際の周波数別運動振幅の代表例を示す。バネ定数が $K=0.05$ kgf/cm の場合の水平運動 X_2 と回転運動 X_6 に注目すると、津波本体の周波数約 0.01 Hz の他に、0.2 Hz 付近に津波の高次の短周期成分が認められ、津波本体の周波数成分よりも短周期成分の方が上回っている。

(2) 外郭防波堤と開口部の影響

図-9(a) に、防波堤開口幅が 0.67 m の場合について、浮体に作用する直前の M8 断層モデルによる津波の水位と C3 地点における岸沖・沿岸流速波形例を示す。また、図-10(a)(b) に、各ケースに対する岸沖・沿岸流速の最

大値を示す。これらによれば、開口部の幅が狭くなると、係留水域内への押し波来襲時の流入流速が増大し、逆に引き波時には流入した水塊が係留水域から沖へ速やかに戻り難くなるため、係留水域内の水位上昇量が增大している。つぎに、図-9(b)(c) は、上記の特性を示す津波が作用した時の浮体の並進運動3成分の波形および重心位置 G の3次元運動の履歴の代表例である。図-11 は、各ケースに対する浮体の6自由度運動成分の最大・最小値の代表例である。

これらによれば、開口幅が狭くなることに伴う、押し波流入流速の増大、引き波時の係留水域外への冲向き流れの阻止効果による水位上昇に対応して、並進運動のうち特に heave X_3 が増大する。これに対し、外郭防波堤で囲まれた場合の回転運動 roll X_4 , yaw X_6 等は外郭防波堤がない場合よりも小さくなる。これは、開口幅が狭くなると、係留水域内全域で水位上昇量が增大するのに伴い、浮体設置箇所とその他の係留水域内の箇所とで局所的な波高分布がつかず係留水域内全域でほぼ様な水位変動を生じ、浮体の傾きが小さくなったものと推察される。

4. おわりに

無ひずみ模型実験によりソリトン分裂津波による係留浮体の共振特性と防波堤開口幅が流入流速・水位・動揺特性に及ぼす影響を明かにした。

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ことを付記する。

参考文献

池野正明 (1992): 浮揚式発電所の不規則波浪による動揺と係留の安定性評価 2-多方向不規則波浪場における3次元動揺解析手法の開発一, 電力中央研究所報告, 研究報告 U92023.
 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 U98006.
 伊藤喜行・千葉 繁 (1972): 浮防波堤の水理に関する近似理論と応用, 港湾技術研究所報告, 第11巻第2号, pp. 137-165.
 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.
 首藤伸夫 (1984): 秋田県北部海岸における日本海中部地震津波, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 247-251.
 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.
 東北大学工学部津波防災実験所・五洋建設編 (1984): 日本海中部地震津波による能代港被災記録, 134 p.
 Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971): The displacement field of inclined faults, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 61, pp. 1433-1440.