

陸上に遡上したソリトン分裂津波の波力に関する実験的研究

池野正明¹・松山昌史²・榊山 勉³・柳沢 賢⁴

大型造波水路を用いて、ソリトン分裂津波が護岸上を越流遡上し矩形構造物に作用する場合について津波波力の実験を実施し波力評価法を検討した。遡上水深が小さくなると、越流水塊が陸上構造物に衝突時により高く跳ね上がり、波圧の作用高さが遡上進行波の水位振幅に対して相対的に大きくなる。波圧値は構造物の陸上付根付近で最大値を示し、遡上水深が小さくなると、朝倉ら (2000) の無次元波圧式を上回る場合がある。これに対し、防波堤を対象とした場合、作用高さと波圧値は進行波津波本体の水位振幅の 3 倍程度である。実験による無次元波圧値を朝倉ら (2000)、池谷ら (2005) の実験結果も含めて整理し、陸上遡上津波の波圧算定式を提案した。

1. はじめに

陸上遡上津波の波力としては、矩形構造物を対象とした朝倉ら (2000)、池谷ら (2005)、直立護岸や家屋を対象とした有川ら (2005) 等の研究例がある。しかしながら、大陸棚上の浅水変形により前傾し先端波形が切り立って発達した津波がソリトン分裂し碎波しながら陸上に遡上し構造物に衝突する場合の波圧分布や波力特性については、まだ未解明な点が多い。そこで、本研究では、ソリトン分裂津波が護岸上を越流遡上し矩形構造物に作用する場合の波圧分布や波力特性を、大型造波水路を用いた模型実験により検討する。つぎに、同じく矩形構造物を対象とした朝倉ら (2000)、池谷ら (2005) の波力実験結果と本実験結果を比較し、陸上遡上津波の波圧算定式を提案する。

2. 実験方法と実験条件

図-1 に示すように、大型造波水路 (長さ 205 m, 幅 3.4 m, 高さ 6 m) に、海底勾配が 1/200 の緩勾配で岸沖長さ 100 m の大陸棚を設置した (松山ら, 2005)。造波水深を 4 m とし、護岸が無い場合の汀線位置を X 座標の原点 (X=0 m) とし、沖向きに X の正座標とした。図-2 に示すように、大陸棚上の X=13.3 m の地点に護岸を設置し護岸上の敷地部に矩形構造物 (縮尺 1/150 相当) を設置した。護岸設置地点の水深は 6.5 cm, 護岸の静水面上天端高さは 8 cm である。構造物の位置を護岸前面から 0.31, 0.61, 1.01 m (実物換算で 50, 100, 150 m 相当) に変化させ、構造物に作用する遡上津波の波圧分布および大陸棚上と護岸上の水位を同時計測した。水位は構造物が無い場合も計測した。入射津波として、周期 60 s の正弦波と孤立波の振幅を 1:4 の重みを乗じ

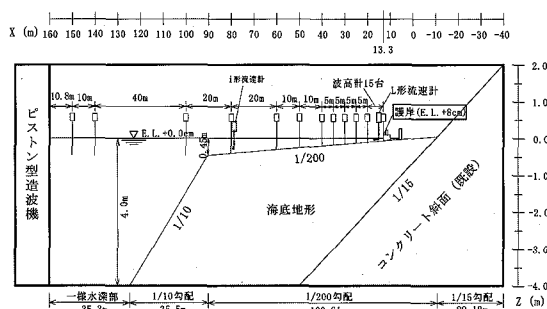
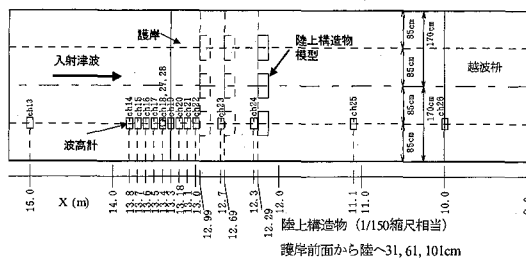
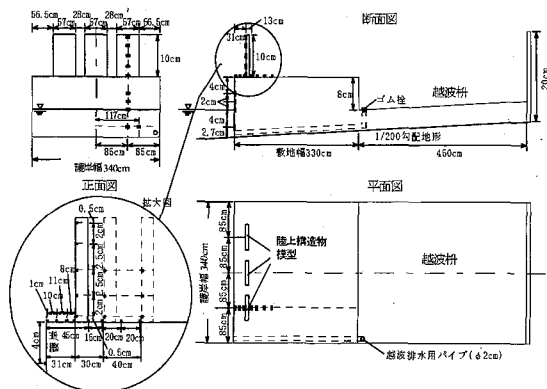


図-1 大型造波水路と大陸棚模型および波高計の配置



(a) 護岸, 陸上構造物, 波高計配置平面図



(b) 陸上構造物, 波圧計配置図

図-2 護岸, 陸上構造物, 波高計, 波圧計配置図

1 正 会 員 工 博 (財)電力中央研究所 環境科学研究所
2 正 会 員 工 修 (財)電力中央研究所 地球工学研究所
3 正 会 員 工 博 (財)電力中央研究所 地球工学研究所
4 正 会 員 工 修 東京電力株式会社 原子力技術・品質安全部

て重ね合わせた波形を孤立波 60 B, 周期 60 s の正弦波と孤立波の振幅を 4:1 の重みを乗じて重ね合わせた波形を孤立波 60 D と定義して用いた。また、周期 120 s の押波初動の正弦波を用いた。造波振幅 (水深 4 m) を 2~3 cm とし、ピストン型造波板で発生させた。孤立波の周期は計測地点を孤立波 1 波が通過する時間の 2 倍 (押波波形の後に対称な波形の引波が仮想的に存在すると考えた時の周期) と定義した。

大陸棚上, 護岸上に容量式波高計を 25 台配置し水位変動を計測した。大陸棚上に電磁流速計を 2 台配置した。小型波圧計を, 護岸前面壁に 4 箇所, 護岸天端面に 7 箇所および陸上構造物前面壁に 5 箇所配置し波圧分布を同時計測した。サンプリング周波数は 1 kHz である。同時波圧データを積分することにより波力合力を求めた。入射波は大陸棚上を伝播しソリトン分裂しながら護岸前面に到達し護岸上を越流遡上しながら砕波する。この時の遡上水位と構造物に作用する波圧や波力との関係を調べた。

3. 実験結果と考察

(1) 津波の変形特性

図-3(a)に, 孤立波 60 B が大陸棚上を伝播し護岸上を遡上する時の水位変動の時系列例 (構造物無) を示す。まず, $X=60$ m の地点では, 孤立波通過後に護岸からの反射波が戻ってくるまでの間 ($t=120\sim160$ s) に, 若干の水位上昇が生じている。これは造波終了後造波板を停止した際に生じる擾乱の影響と推察される。大陸棚上を伝播するに従い, 浅水変形により波形が前傾化して波形前面が壁のように切り立ち, $X=30$ m の地点で波形先端がかなり発達する。 $X=25\sim20$ m の地点で津波の先端部に明瞭なソリトン分裂波が発生する。 $X=15$ m の地点から護岸に近くなると, 護岸からの反射波と入射波とがほぼ完全に重なり合い入射波の判別は難しい。

津波は, $X=13.3$ m の護岸前面壁位置で重複波を形成するとともに, 護岸上を越流して遡上する。 $X=13.18\sim11.1$ m の地点の波形が遡上波の波形である。 $X=13.18\sim12.3$ m の地点では, 津波本体の上部とそれに重畳したソリトン分裂波が越流遡上している。遡上に従い, 分裂波は砕波して消滅し, $X=11.1\sim10$ m の地点では, 津波本体のみの波形となる。

図-3(b)に, 護岸前面から 0.31 m の位置に構造物を設置した場合の構造物前後の水位変動の時系列例を示す。

注目すべき点として, 図-3(a) および図-3(b) の $X=13$ m (構造物前面壁設置地点に対応) の地点における水位波形を比較すると, 構造物が無い場合には最大水位振幅が 1.8 cm であるのに対して, 構造物を設置した場合には 9.3 cm と 5 倍に増大している。紙面の都合上, 図の掲載は省略するが, 孤立波 60 D および周期 120 s

の正弦波では, 前述の孤立波 60 B 程顕著なソリトン分裂波は発生しなかった。

(2) 水位変動と波圧との関係

図-4(a)に, 構造物に作用する波圧の時系列例 (孤立波 60 B) を示す。津波の越流水塊は構造物の陸上付根付近に衝突するため, 陸上付根付近 (陸上地面からの高さ 0.5 m) で波圧値が大きくなり, 上にいくに従い波圧値が小さくなっている。陸上高さ 5 cm 以下の位置での波圧波形は, 越流した津波本体の波圧成分の上にはっきりとした短周期の分裂波の波圧成分が確認できる。

図-4(b)に, 波圧の時系列を鉛直方向に積分して求めた水平波力の時系列例を示す。波力波形は陸上付根付近の波圧波形と類似している。水平波力は構造物の位置を護岸前面から 0.61, 1.01 m と陸側へ変化させても, 顕著な水平波力の低減は見られなかった。これは, 津波本体とソリトン分裂波の波長が約 50 m, 約 0.8 m と構造物設置距離に比べて長く, 護岸越流時に発生する乱れ成分が充分減衰せず乱れの影響がまだ強いためであると推察される。

図-3(b)の構造物前面壁 ($X=13$ m) における水位変動と図-4(a)の波圧の波形とを比較すると, 水位変動の分裂波の波形の周期は 1 s であるのに対し, 波圧では, 分裂波の水位変動の周期 1 s に対応する波形の中に, 構造物衝突時に発生する衝撃波圧成分が含まれている。実験結果から, 遡上水深が小さくなると, 上記の乱れの影響により, 不規則なパルス波形が波圧データに明瞭に含まれることがわかった。なお, 本波圧波形から, 有川ら (2005) が指摘している衝撃波圧と重複波圧の明確な区別は難しい。

池谷ら (2005) は, 護岸を越流する津波が 3 次元陸上構造物へ作用する場合の波力実験を実施し, 同様に不規則な衝撃的成分が波圧データに含まれることを報告している。池谷ら (2005) によれば, 同じ入射条件の実験を複数回実施し, 毎回の実験でほぼ同一の波形を示す波動圧成分と, 毎回の実験で発生の有無やタイミングが異なる衝撃的な変動波圧成分の双方があるとし, ローパスフィルターを用いて, 毎回の実験でほぼ同一の波形を示す波動圧成分を抽出している。

図-5 は, 構造物前面壁における水位変動と陸上高さ 0.5 m の位置における波圧の周波数応答特性を周波数別エネルギー振幅として示した代表例である。水位変動では, 10 Hz 以上の高周波数帯のエネルギー振幅が非常に小さいことから, 津波本体, 分裂波およびその砕波に起因するエネルギー振幅は, 10 Hz 以下の周波数領域に存在すると考えることができる。これに対し, 波圧では, 10 Hz 以上の高周波数帯でも特定の周波数で有意なピークが見られる。これは, 前述の構造物衝突時に発生する衝撃波圧成分に対応するものと考えられる。

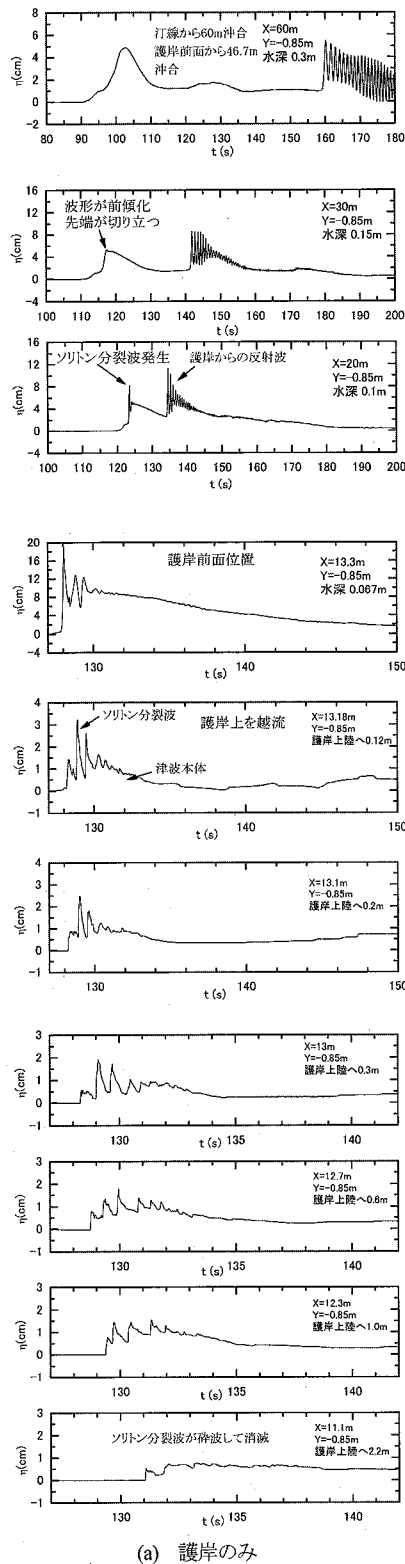
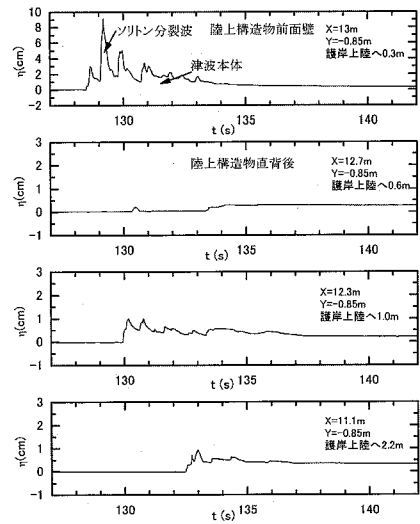
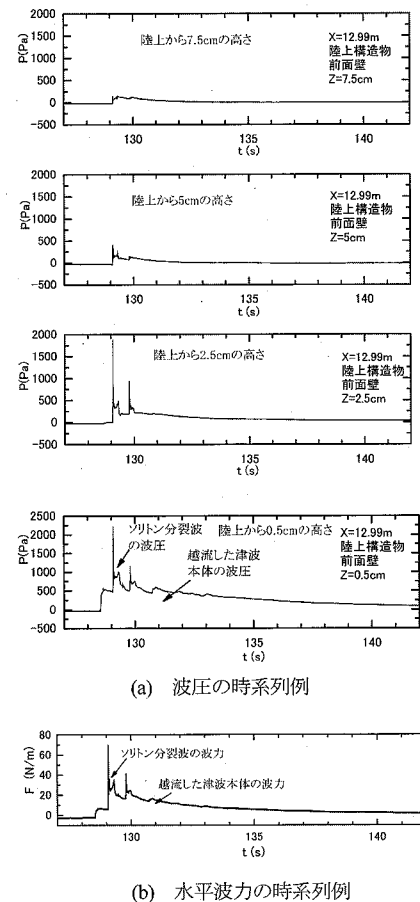


図-3 水位変動の時系列例 (孤立波 60B, 3cm)

(b) 護岸前面から 0.31m の位置に構造物有
図-3 水位変動の時系列例 (孤立波 60B, 3cm)図-4 波圧と波力の時系列例
(孤立波 60B, 3cm, 護岸前面から 0.31m に構造物)

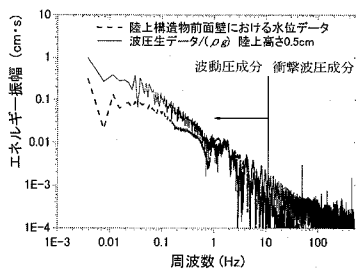


図-5 波圧と遡上水位変動の周波数応答特性
(孤立波60B, 3cm, 護岸前面から0.31mに構造物)

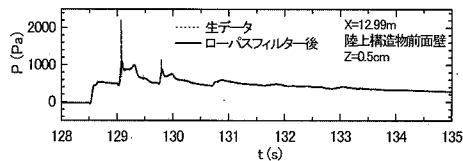


図-6 ローパスフィルター前後の波圧時系列データの比較例
(孤立波 60B, 3cm, 護岸前面から 0.31m に構造物)

(3) ローパスフィルター使用前後の波圧の比較

衝撃波圧成分は発生が不規則であることから、その特性を詳細に検討することは、現時点では困難である。そこで、池谷ら (2005) にならい、図-5 の水位変動のエネルギー周波数帯より高周波数の波圧成分をローパスフィルターを用いてカットすることにより、波動圧成分を抽出し、その波圧特性を詳細に分析することにした。

図-6 に、ローパスフィルター使用前後の波圧時系列の比較例を示す。ローパスフィルターにより、水位変動の周期に対応する波動圧成分が適切に抽出されている。

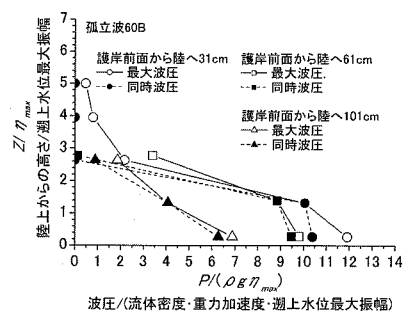
図-7 に、ローパスフィルター使用前後の無次元波圧分布の比較例を示す。図(a)が生データに対する各鉛直高さにおける最大波圧と最大水平波力発生時の同時波圧、図(b)がローパスフィルター使用後の各鉛直高さにおける最大波圧を示している。無次元化のための η_{max} は構造物設置位置での進行波最大遡上水深(水位最大振幅)である。

図-7(a)によれば、各鉛直高さにおける最大波圧と最大水平波力発生時の同時波圧の鉛直分布は、陸上付け根付近で若干差異が生じているものの、概してほぼ同じ特性を示すことから、越流津波は構造物前面壁に、陸上付け根から最大作用高さまでほぼ同時に衝突していると判断できる。図-7(b)によれば、ローパスフィルターにより、不規則に発生する衝撃波圧成分がカットされた結果、縦軸 $Z/\eta = 0 \sim 2$ 付近の波圧値が低減し、陸上高さが高くなるに従い、次第に最大波圧値が小さくなっている。

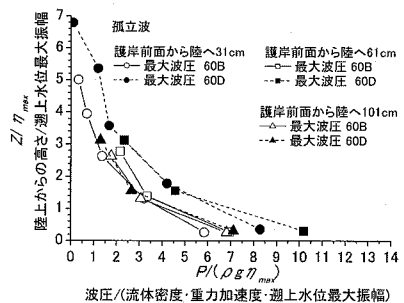
4. 津波波圧算定式の提案

(1) 池谷ら (2005) の波力実験の概要

池谷ら (2005) は、海底勾配 1/200 の大陸棚上の水深



(a) 生データ



(b) ローパスフィルター後

図-7 ソリトン分裂波の波圧分布の比較例(孤立波, 3cm)

5.5 cm の地点に静水面上天端高さが 4cm の護岸を設置し、矩形構造物(縮尺 1/100 相当)を護岸前面から 25, 50, 75, 100 cm (実物換算で 25, 50, 75, 100 m 相当)の位置に設置して、波力実験を実施している。造波振幅(水深 1m)を 7~15 cm とし、ピストン型造波板で孤立波を発生させている。池谷ら (2005) の実験では、護岸天端高さ (4 cm) が本実験 (8 cm) よりも低く、孤立波の入射振幅が 7~15 cm と本実験の入射振幅 2~3 cm よりも大きいため、津波の越流遡上量も本実験よりも相対的に大きい。このため、最大波圧値と最大作用高さは概して本実験よりも上回っている。

(2) 陸上遡上した津波波圧算定式の提案

図-8 は、ローパスフィルターにより抽出した波動圧成分を対象に、波圧作用高さと最大波圧値を構造物設置位置での遡上進行波水位最大振幅 η_{max} で無次元化して整理した結果である。図中の太実線と太破線は、過去に実施された朝倉ら (2000) による護岸を越流する津波の無次元波圧算定式を示す。

防波堤の場合の波圧最大作用高さは、進行波津波本体の水位振幅の 3 倍程度であった (池野ら, 2005)。これに対し、陸上構造物の場合は、津波衝突時に前面壁でより高く跳ね上がり、波圧の最大作用高さが遡上進行波の水位振幅の 6 倍程度まで及ぶ場合がある。波圧値は構造

物の陸上付根付近で最大値を示し、遡上進行波の水位振幅の10倍程度に相当する水圧が作用することがあることもわかる。これに対し、防波堤の場合の波圧値は最大で進行波津波本体の水位振幅の3倍程度であった。

本実験結果は、朝倉ら(2000)の無次元波圧算定式を上回る結果となっている。朝倉ら(2000)の実験における護岸越流水深は5 cm ($\eta/h=0.9$)以上であり、比較的越流量が大きい実験であったのに対し、本実験における護岸越流水深は1~2 cm ($\eta/h=0.3$)と比較的越流量が小さい実験となっている。このため、越流水塊が射流状態となって速い流速で構造物前面壁に衝突し真上に高く打ち上げられるため、波圧が相対的に増大したと推察される。

池谷ら(2005)による実験値と本実験値とを比較すると、入射振幅が小さく、護岸越流量や遡上水深が小さい場合 ($\eta/h=0.3$) は、無次元最大波圧や無次元最大作用高さが本実験値とよく一致している。これに対し、入射振幅が大きくなり、護岸越流量や遡上水深が大きくなると ($\eta/h=0.5, 0.9$)、無次元最大波圧や無次元最大作用高さが本実験値よりも小さくなり、朝倉ら(2000)の無次元波圧算定式に近づくことがわかる。

以上を踏まえて、実験による無次元波圧値を朝倉ら(2000)、池谷ら(2005)の実験結果も含めて整理し、陸上遡上津波の波圧算定式を図-8中の実線と破線および図-9に示すように提案する。以下に提案する波圧算定式を示す(図-9中の記号参照)。

・津波本体の波圧 P_1

$$P_1(Z)/(\rho g \eta_{max}) = -Z/\eta_{max} + \alpha \quad (1)$$

・ソリトン分裂波卓越部の波圧 P_2

$$P_2(Z)/(\rho g \eta_{max}) = K_1(-Z/(K_2 \eta_{max}) + \alpha) \quad (2)$$

・作用波圧 P

$$P(Z) = \max(P_1(Z), P_2(Z)) \quad (3)$$

ここに、

$$\alpha = 1.35/(\eta_{max}/h) + 1.5; 0.3 \leq \eta_{max}/h \leq 0.9 \quad (5)$$

$$K_1 = 1.8, K_2 = 1.35/\alpha \quad (6)$$

すなわち、津波本体の波圧を P_1 で算定し、ソリトン分裂波が作用する場合には、図-9の斜線部分の波圧 (P_2 と P_1 の差分) を付加することとする。

5. 結 論

(1) 遡上水深が小さくなると、越流水塊が陸上構造物に衝突時により高く跳ね上がり、無次元波圧値が相対的に大きくなる。

(2) 朝倉ら(2000)、池谷ら(2005)の実験結果も含めて整理し、陸上遡上津波の波圧算定式を提案した。

最後に、本研究は、電力共通研究の成果の一部である

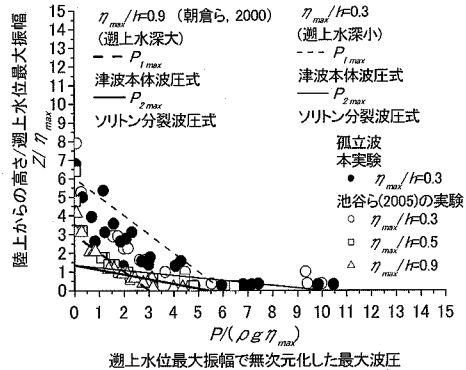


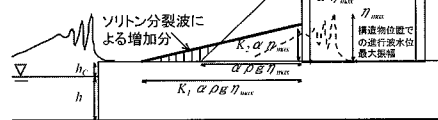
図-8 無次元化された波動圧成分の鉛直分布

津波本体の波圧

$$P_1(Z)/(\rho g \eta_{max}) = -Z/\eta_{max} + \alpha$$

ソリトン分裂波卓越部の波圧

$$P_2(Z)/(\rho g \eta_{max}) = K_1(-Z/(K_2 \eta_{max}) + \alpha)$$



$$\text{作用波圧 } P(Z) = \max(P_1(Z), P_2(Z))$$

$$\alpha = 1.35/(\eta_{max}/h) + 1.5; 0.3 \leq \eta_{max}/h \leq 0.9$$

$$K_1 = 1.8, K_2 = 1.35/\alpha$$

図-9 陸上遡上した津波の波圧算定式の提案

ことを付記するとともに、(社)土木学会原子力土木委員会津波評価部会(主査 首藤伸夫 日本大学教授)の委員の皆様から有益な助言を賜りました。また、既存の波圧実験データの分析では、鹿島建設株式会社の池谷毅氏、朝倉良介氏、東電設計株式会社の大森政則氏の協力を得ました。ここに記して、謝意を表する次第です。

参 考 文 献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則(2000): 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻 (2), pp. 911-915.
- 有川太郎・池辺将光・山田文則・下迫健一郎・今村文彦(2005): 護岸・陸上構造物に対する津波力の大規模実験, 海岸工学論文集, 第52巻 (1), pp. 746-750.
- 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 (2), pp. 751-755.
- 池谷 毅・朝倉良介・藤井直樹・大森政則・入谷 剛・柳沢 賢(2005): 陸上構造物に作用する津波波圧の時空間変動特性, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 121-126.
- 松山昌史・池野正明・榊山 勉・柳沢 賢・藤井直樹(2005): 大陸棚上におけるソリトン分裂した津波の碎波に関する無ひずみ模型実験, 海岸工学論文集, 第52巻 (1), pp. 241-245.