

護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究

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*****

1. はじめに

沿岸域での津波の変形や陸上への遡上現象および構造物に作用する力の発生メカニズムは、工学的に非常に重要な項目であるが、十分には解明されていない。これは、浅海域および陸上部での津波の挙動が複雑であるためである。

津波の波力に関する研究は、1960 年代より盛んに実施されている。防波堤等の海域部に位置する構造物に作用する津波波力の算定には、谷本ら(1983)、池野ら(1998a, 1998b) が提案している設計式がある。

陸上構造物を対象とした津波波力に関しては松富ら(1998, 1999)の研究があるが、明確な評価法が確立されているとは言えないのが現状である。

そこで本研究では、直立護岸を越流した津波の遡上特性から護岸背後の陸上構造物に作用する波力の評価手法を提案することを目的として 2 次元水理模型実験を実施した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験には、鹿島技術研究所の中型水路を用いた。水路の諸元は長さ 60 m、幅 0.7 m、高さ 1.5 m であり、流量可変式津波発生装置が装備されている。実験水路の全景を図-1 に示す。一様水深部の水深を 92 cm とし、水路床より約 1/10 の急勾配斜面を設け、そこから津波の浅水変形現象を再現するために一様勾配斜面の長さを 24.0 m 確保した。直立護岸の背後に 4.0 m の水平部を設け、さらにその背後は 1/5 勾配斜面とした。これより陸上部へ遡上した津波の戻り流れを再現した。流量可変式津波発生装置とは、水路を実験スペースと貯水タンクの 2 つに分け、それらを管路で結合し、その間にインバータ制御機能付きのポンプを設置したものである。これより管路

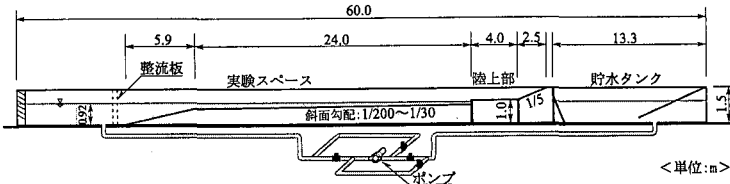


図-1 実験水路

表-1 実験条件

斜面勾配	1/200, 1/100, 1/50, 1/30	
波条件 (正弦波)	波高 (cm)	10, 15, 20
	周期 (秒)	42, 63, 126, 336
	初期位相	押し初動, 引き初動
構造物の位置	護岸先端からの距離	50, 100, 150, 200 (cm)
護岸前面の水深	11.0 cm	
護岸の天端高	静水面から 8.0 cm	

を流れる流量と流向を時間的に変化させて、実験水路内に正弦波を含む任意波形の長周期波を造波することができる。

2.2 実験条件

実験条件を表-1 に示す。波条件は一様水深部でのものであり、斜面勾配が 1/200 のとき、ソリトン分裂を起こす波が 3 波含まれている。また実験には護岸を越流した波のみを用いた。以上より斜面勾配、構造物の位置、波条件をそれぞれ変化させて合計 84 ケースの実験を行った。

2.3 計測方法

実験は遡上実験と波圧・波力実験からなる。まず、構造物を設置しない条件で遡上実験を行い、陸上部に遡上する津波の遡上水深と遡上流速を計測した。それぞれの計測方法を図-2 に示す。波高の計測には容量式波高計を用い、サンプリング間隔は 1/50 (s) とした。また遡上流速の計測にはレーザードップラー流速計を用い、サンプリング間隔は 1/200 (s) とした。次に陸上部に構造物の模型を設置して実験を行い、構造物に働く波圧・波力を計測した。波圧の計測には超小型波圧計(直径 10 mm、

* 正会員 工修 鹿島技術研究所 環境技術研究所
** 正会員 鹿島技術研究所 環境技術研究所
*** 正会員 工博 鹿島技術研究所 環境技術研究所
**** 正会員 工修 東京電力株式会社 原子力技術部
***** 正会員 東電設計株式会社 原子力土木部

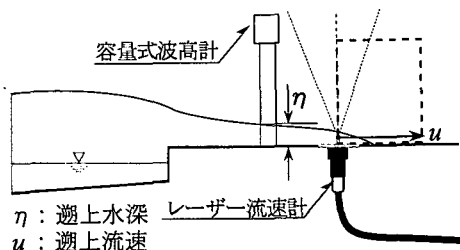


図-2 遡上水深と遡上流速の計測方法

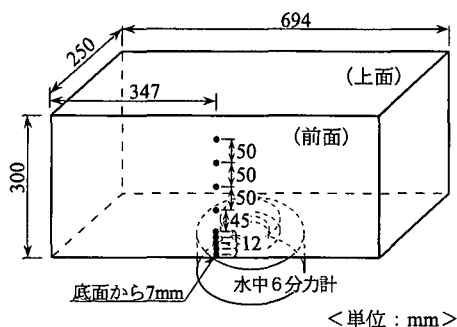


図-3 波圧計と水中6分力計の設置位置

厚み 3 mm, 応答周波数 10 kHz) を, 図-3 に示すように正面に 9 箇所取り付け, 波力の計測には水中 6 分力計を用いた。どちらの計測機器も微少な時間の衝撃的な波力を計測できるようにサンプリング間隔は 1/1000 (s) とした。また実験は, 実験毎のパラツキを考慮して 1 ケースについて 3 回ずつ行い, その平均値を用いた。

3. 実験結果

3.1 遡上水深・流速

護岸先端から 1.0 m 離れた地点でのソリトン分裂波の遡上水深と遡上流速の時系列の一例を図-4, 図-5 に示す。図-4 を見ると大きく二つの山に分かれているが, 1 つ目の山は陸上部へ遡上した波の進行波の水深であり, 2 つ目の山は背後の 1/5 勾配斜面へ到達した波が戻ってくる時の水深である。図-4 よりソリトン分裂の影響で遡上水深もソリトン波の振幅分だけ変動していることがわかる。図-5 を見ると計測地点に波が到達したと同時に流速が最大となり, ほぼ一定の流速を維持する。戻り流れが計測地点を通過すると逆向きの流れになるが, 進行波の流速に比べると小さい値となった。

3.2 構造物に働く波圧・波力

6 分力計による水平波力の計測値と構造物の正面での波圧積分波力を図-6 に示す。両者はよく一致しており, 計測結果に整合性が見られた。これより波力の算定には波圧計の計測値を用いることにした。実験で得られた構造物前面に働く最大波圧の鉛直分布を図-7, 図-8 に示

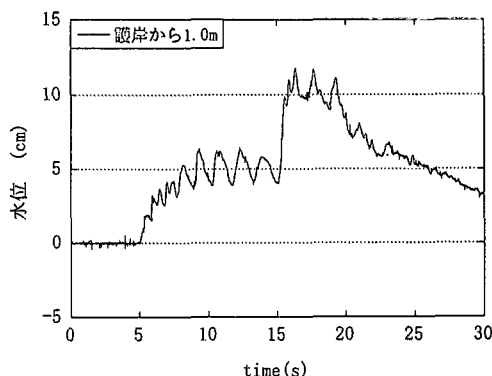


図-4 遡上水深の時系列

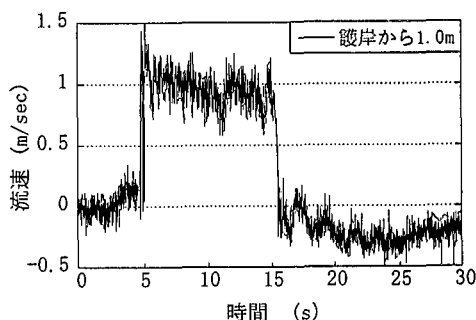


図-5 遡上流速の時系列

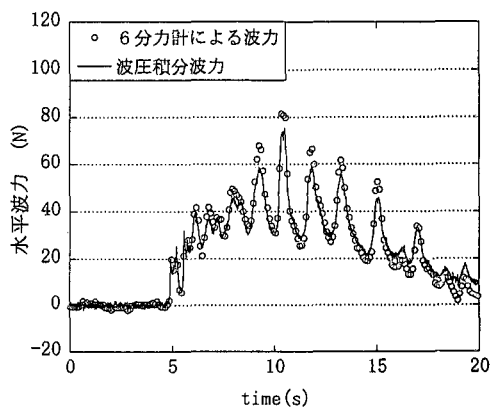


図-6 水平波力の比較

す。凡例中の up は押し初動の正弦波, dn は引き初動の正弦波である。図-7 は非分裂波の最大波圧分布であり, 図-8 はソリトン分裂波の最大波圧分布である。縦軸は波圧計が取り付けられている地表面からの高さであり, 横軸は各計測点での波圧の最大値である。図-7 を見ると波条件や斜面の勾配によって波圧の最大値に違いはあるものの分布形としては相似であることがわかる。また図-8 を見ると構造物の上方の波圧は概ね図-7 と同じ

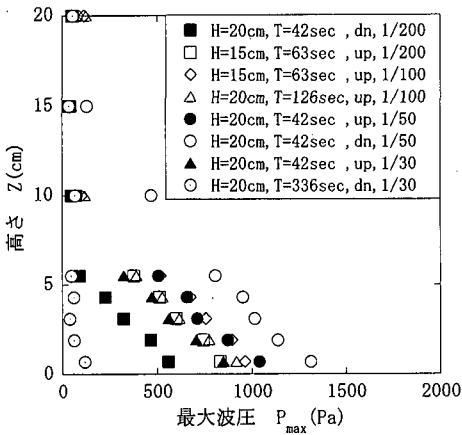


図-7 非分裂波の最大波圧分布

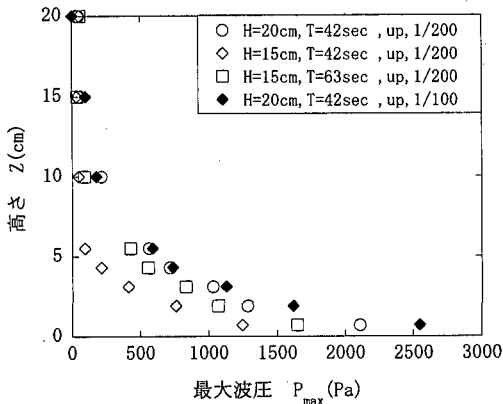


図-8 ソリトン分裂波の最大波圧分布

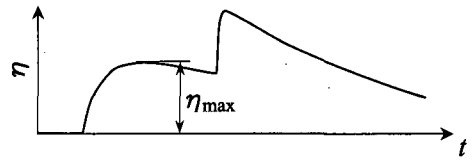


図-9 非分裂波の最大遡上水深

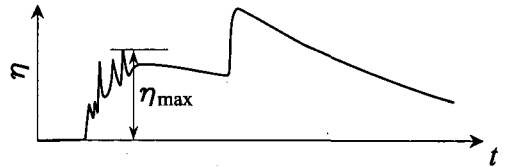


図-10 ソリトン分裂波の最大遡上水深

ここで $P_{\max}/\rho g \eta_{\max}$ を無次元最大波圧と呼ぶことにする。図-11を見ると無次元最大波圧分布は底面部で最大となり上へ行くに従って線形に小さくなっていることが分かる。ここで直線と横軸との交点を水平波圧指標 α と呼ぶことにする。周期が短いとき α は 3.0 程度であるが、周期が非常に長くなると、陸上部への遡上現象は準定常現象となる。すなわち水位が静的に上昇して下降する。そのため遡上水深に対応する圧力水頭とその地点での波圧は等しくなり α は 1.0 (静水圧) に近くなることがわかる。

遡上現象の特性を表す指標として $F_r = u_{\max}/\sqrt{g\eta_{\max}}$ で表されるフルード数 F_r を用いた。ここで $\eta_{\max}$ は最大遡上水深、 $u_{\max}$ は最大遡上流速である。 $\xi_{\max}$ と $u_{\max}$ の設定を図-12に示す。構造物に働く波力を評価するためには水深が最大となるとき、または流速が最大となるときのどちらの要素も重要であることからこのような定義を行った。

構造物前面での α と F_r の関係を図-13に示す。フルード数が 1.5 以上では α が最大 3.0 程度であり、フルード数が小さくなり 1.0 近くになると α はほぼ 1.0 となることがわかる。これより非分裂波の α は 3.0 で評価できる。最終的に構造物に働く波圧分布は図-14のようになる。これより構造物に働く水平波力は以下の式(1)のように評価できる。

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot 3\eta_{\max} \cdot 3\rho g \eta_{\max} = 4.5\rho g \eta_{\max}^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F_x : 水平波力、 $\eta_{\max}$: 最大遡上水深、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度である。

式(1)を用いると水平波力は図-15のようになり推定値で包絡できる。したがって上述した評価法で非分裂波の最大水平波力を評価できると考えられる。

であるが、構造物の底面近傍での最大波圧が非分裂波の場合より大きくなっていることがわかった。

4. 波圧の評価

3.2において非分裂波とソリトン分裂波では最大波圧の分布形が異なることがわかった。そこで非分裂波の波圧とソリトン分裂波の波圧の2種類に分けて検討を行った。

構造物に働く波力の評価は構造物がない状態での遡上水深と遡上流速の諸量を用いて推定することとした。遡上特性を考慮して、また松富(1991)を参考にして最大波圧 $P_{\max}$ を $\rho g \eta_{\max}$ で除すことにより無次元化した。ここで最大遡上水深 $\eta_{\max}$ を図-9、図-10に示す。非分裂波の遡上水深は進行波の最大値を、ソリトン分裂波の遡上水深はソリトン波を含む水面波形の地表面からの高さとした。

4.1 非分裂波の波圧

構造物前面の無次元最大波圧分布を図-11に示す。こ

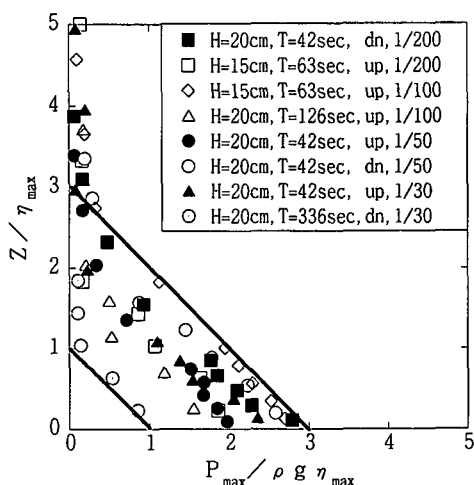


図-11 無次元最大波圧分布

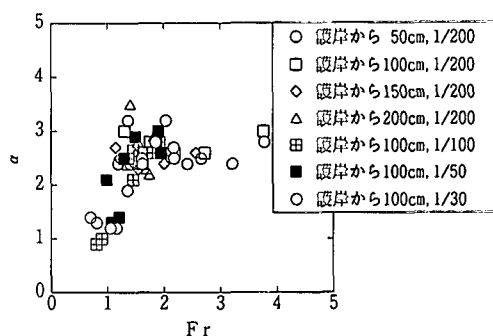


図-13 α と Fr の関係

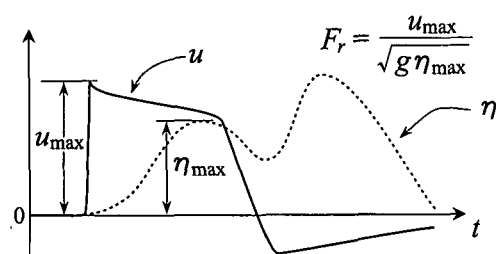


図-12 η_max と u_max の設定

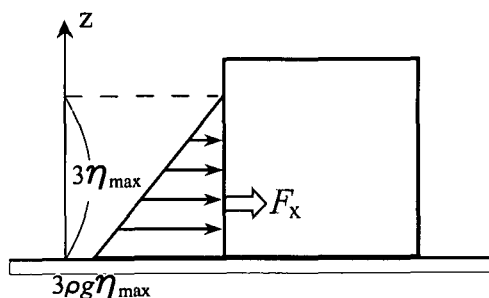


図-14 構造物に働く津波水平波圧

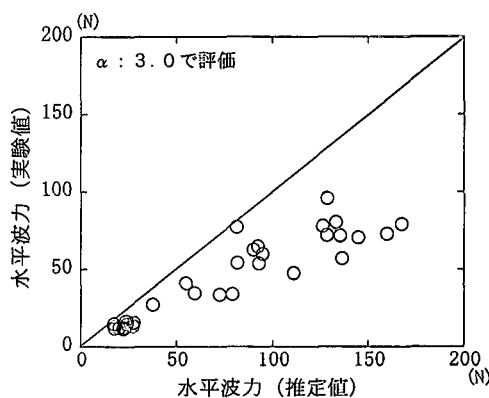


図-15 水平波力の推定

4.2 ソリトン分裂波の波圧

ソリトン分裂波は、津波の先端が短周期成分を有する複数の波に分裂して津波本体に重なって進行する波である。そのため図-8に示したように陸上構造物の底面近傍の波圧が、非分裂波の波圧に対してかなり大きくなる。ここでは4.1と同様の無次元化を行った。構造物前面の無次元最大波圧分布を図-16に示す。ソリトン分裂波の無次元最大波圧と非分裂波の無次元最大波圧(図-11参照)を比較すると、構造物上方2/3では非分裂波と似た分布形となっているが、構造物下部ではソリトン分裂波の方がかなり大きくなった。これは図-9、図-10の時系列に示すように、非分裂波は波面の切り立った波が構造物に衝突するのが最初の先端波のみであるのに、ソリトン分裂波は複数のソリトン波のため波面がさらに切り立った波が数回にわたって構造物に衝突するためである。ソリトン分裂波の波圧分布を図-17に示す。ソリトン分裂波の場合、構造物下部ではαは非分裂波の約1.8倍、作用高は非分裂波の約0.45倍となる分布で評価すればよいと考えられる。これよりソリトン分裂波の水平波力は、非分裂波に対して約20%増加することがわかった。

5. 結 論

今回、直立護岸背後の陸上構造物に作用する津波波力の評価手法を提案することを目的とし、断面2次元水路を用いて実験的な研究を行った。その結果以下の知見が得られた。

- 1) 護岸を越流して構造物に作用する波圧分布は、構造物が存在しない場合の遡上水深のみで評価することが可能であり、遡上水深に基づく静水圧分布の相似形で表現できる。

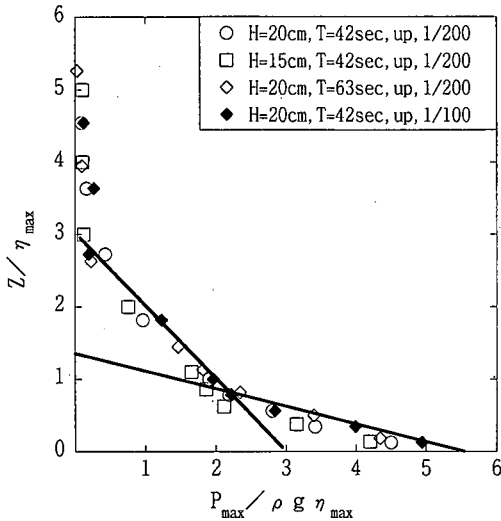


図-16 無次元最大波圧分布

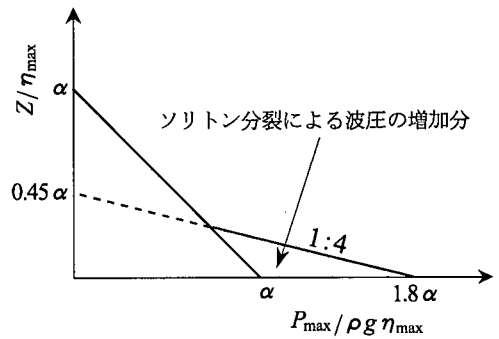


図-17 ソリトン分裂波の無次元最大波圧分布

6. おわりに

本研究を遂行するに当たり、東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター今村助教授および電力中央研究所 田中上席研究員、池野主任研究員、松山主任研究員から津波波力の評価法に関して貴重なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 池野正明・松山昌史・田中寛好 (1998a): 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, 31 p.
- 池野正明・松山昌史・田中寛好 (1998b): 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, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 366-370.
- 谷本勝利・高山知司・村上和男・村田 繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野晋・平石哲也 (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.
- 松富英夫 (1991): 碎波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 626-630.
- 松富英夫・飯塚秀則 (1998): 津波の陸上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 361-365.
- 松富英夫・大向達也 (1999): 津波氾濫流の流体力に関する実験, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 336-340.

- 2) 非分裂波の場合, 構造物前面に作用する波圧分布を規定する水平波圧指標 (遡上水深に相当する静水圧分布の倍率) α は最大で3.0となる。この指標は今回定めた遡上のフルード数に依存しており, このフルード数が1.0に近づくとも α も1.0(静水圧)に漸近する。
- 3) 構造物前面の α を3.0で評価すると, 今回行った護岸を越流した津波による水平波力のすべての実験値を包絡することができる。これより今回提案した方法で直立護岸背後の構造物に作用する津波波力の推定が可能になると考えられる。
- 4) ソリトン分裂波の場合, 構造物前面に働く波圧の分布形は非分裂波の場合と異なる。構造物上方2/3は水平波圧指標 α で規定される分布で近似されるが, 構造物の底面近傍では非分裂波の α を1.8倍した値となる。これより水平波力は非分裂波に比べて約20%大きくなることが明らかとなった。