

直立護岸を越流した津波の水位・流速および波力の数値計算

大森 政則*・藤井 直樹*・京谷 修*
高尾 誠**・金戸 俊道**・池谷 毅***

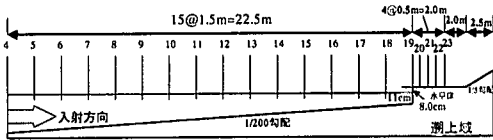
1. はじめに

陸上での津波の挙動を明らかにすることは、津波防災対策上重要な問題であり、中でも特に津波が構造物に与える力を評価することは極めて重要である。そのためには、陸上構造物に作用する津波力を実験的に明らかにするとともに、陸上に遡上した津波の水位と流速の計算精度を向上させる必要がある。陸上構造物を対象とした津波力に関する研究としては、松富ら(1998)、朝倉ら(2000)などがある。一方、海域における津波計算では、分裂・砕波を含む津波の変形を実験との比較から精度良く評価できることを確認している(佐藤, 1995; 藤井ら, 1996)。また、陸上域における計算では、主に津波の遡上高について検討されているので、水位の算定については比較的精度良く計算されていると評価できる。しかしながら、分裂・砕波を含めた遡上域における津波の水位や流速については検討されていない。

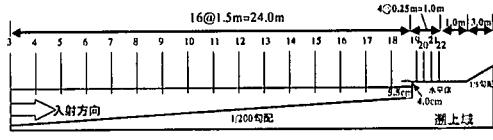
そこで、本研究では、直立護岸を越える津波の陸上遡上を対象として、水位および流速の計算精度を向上させることを目的に、水理模型実験結果(朝倉ら(2000)の一部報告)の再現計算を行った。そして、得られた水位と流速を用い陸上構造物に作用する津波力の算定を試み、実験結果と比較した。

2. 水理模型実験

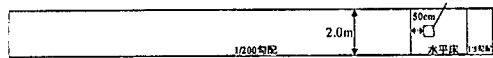
図一および図二に計算の対象とした実験設備と計測点配置を示す。実験は、図一に示す中型水路(長さ 60 m×幅 0.7 m×高さ 1.5 m)と図二に示す大型水路(長さ 62 m×幅 2 m×高さ 2 m)を用いて行った。縮尺は、大型水路がフルードの相似則において 1/100、中型水路が 1/50 である。海域の斜面勾配は 1/200 とし、直立護岸背後は水平床で、その背後に 1/5 勾配を設けることで、遡上した波の戻り流れも再現できるようにした。中型水路では、構造物を設置しない条件での遡上実験、大型水路では遡上実験の他に水平床に構造物模型を設置した波力



図一 中型水路断面図と計測点



(1) 断面図



(2) 平面図

図二 大型水路断面・平面図と計測点

表一 実験ケース

ケース	実験水路	波の種類	波高	周期
1-A	中型	非分裂波	15 cm	63 s
1-B	中型	分裂波	20 cm	63 s
2-A	大型	非分裂波	4.5 cm	60 s
2-B	大型	分裂波	4.5 cm	30 s

実験も実施した。

水域では、波高を 1.5 m 間隔で計測し、遡上域では波高と流速を 4 カ所で計測している。さらに再現計算の入力のために、沖側で流速の値も計測している。大型水路の波力実験では、陸上水平部に構造物を設置し、前面で波圧を測定した。

表一に実験ケースを示す。大型実験、中型実験ともに、護岸前面でソリトン分裂を発生する条件の実験も行っており、合計で 4 ケースの実験を行った。

3. 数値計算の概要

津波数値計算に用いた基礎方程式としては、非線形長波方程式とブシネスク方程式を用いた。非線形長波方程式は、リープフロッグ法により差分化して解く一般的な長波の計算手法を用いた。ブシネスク方程式は金山ら

* 正会員 東電設計(株) 原子力土木部
** 正会員 工修 東京電力(株) 原子力技術部
*** 正会員 工博 鹿島建設(株) 技術研究所 環境技術研究部

(1994)と同様の計算方法を用い、碎波の評価には佐藤・Kabiling(1993)の碎波による運動拡散項を導入し、流速波速比が0.7を越えたとき碎波すると判定した。計算格子間隔および計算時間間隔は、非線形長波方程式が5 cm, 0.01 秒, ブシネスク方程式は、護岸前面でソリトン分裂する波の周期も考慮してそれぞれ2.5 cm, 0.0025 秒で計算を行った。境界での入力値は、大型実験がCh3, 中型水路がCh4での水位(η)および流速(u)の計測から、線流量 $M(=u \times (h + \eta))$ に換算して強制入力した。

4. 再現計算結果および考察

再現計算における検討手順としては、まず遡上域のみを対象として精度良く実験結果を再現できる手法に関する検討を行い、その後に海域から遡上域までの一連の解析を行った。

(1) 陸上遡上計算

計算は、非分裂で遡上する中型水路のケース1-Aを用い、遡上域のみを計算対象とするため、遡上域Ch20で計測された水位と流速を線流量に変換した値を入力境界値として計算を行った。非線形長波方程式を用いて計算し、計算条件は計算格子間隔を5 cm, 計算時間間隔を0.005 秒, 水位の打ち切り水深を事前検討の結果、数値振動が起こらない 1.0×10^{-7} mとした。

陸上遡上計算では、通常先端条件として、岩崎・真野(1979)の方法と相田(1977)の方法が用いられている。そこで、この2つの方法による計算結果と実験結果の比較を行った。図-3は、Ch23の水位変動を比較した図である。相田の方法を用いた計算は先端波および戻り流れの位相が実験結果より遅れているのに対し、岩崎・真野の方法では戻り流れが実験結果より速いものの、先端波は実験結果を精度良く再現している。しかし、岩崎・真野の方法の戻り流れが速いため、底面摩擦としてマンニングの粗度係数を考慮した。図-4は、岩崎・真野の方法にマンニングの粗度係数を考慮したときの計算結果である。摩擦を考慮していない計算結果は、戻り流れが実験結果より速いのに対し、マンニングの粗度係数0.01を考慮した計算結果は、位相のずれがほとんどなく計算できている。

以上の結果より陸上遡上計算では、先端波条件として岩崎・真野の方法、底面摩擦にマンニングの粗度係数0.01を考慮して計算することで精度良く実験結果を再現することがわかった。そこで、非分裂で遡上するケース1-Aに対して、実験と計算による水位波形を比較した。図-5はその結果であり、計算結果は、先端の進行あるいは戻り流れの位相、振幅とも実験を精度良く再現できている。

図-6は、護岸前面で分裂したのち遡上するケース1-Bに対する実験と計算による水位波形の比較図である。分裂する波の遡上も、高周波成分が遡上過程で急激

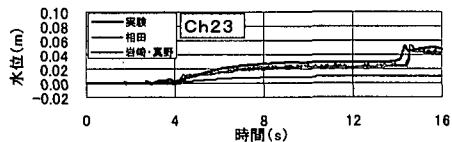


図-3 先端条件の比較 (ケース1-A)

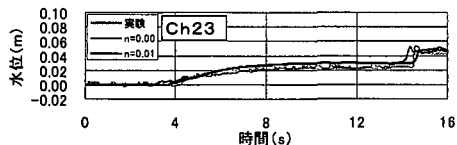


図-4 粗度係数の比較 (ケース1-A)

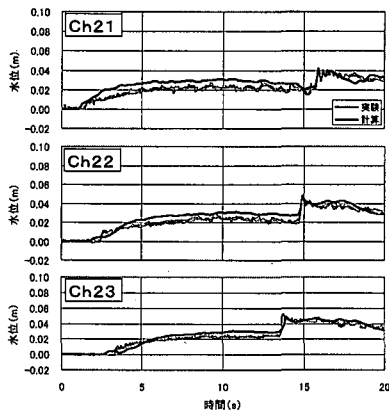


図-5 非分裂波の水位時系列 (ケース1-A)

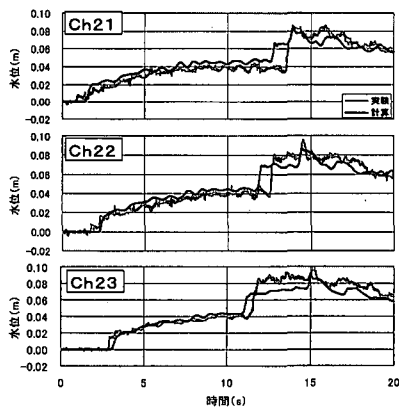


図-6 分裂波の水位時系列 (ケース1-B)

に減衰するため、分散項を考慮しなくても再現可能と考えられる。したがって、護岸前面での分裂の有無によらず、陸上部に遡上した波は非線形長波方程式で再現が可能である。

(2) 海域から遡上域までの一連の計算

遡上域での計算精度が確認されたので、中型水路は

Ch4 から、大型水路は Ch3 から遡上域まで対象とした一連の計算を行った。図-7 に中型水路のケース 1-A の場合の越流量と水位時系列の計算結果と実験結果の比較を示す。計算結果の越流量は、実験結果より過大となってしまうため、水位が大きくなっている。今回の実験では直立護岸を対象としており、堰の越流公式等により直立護岸を越流する流量を検討することとした。越流式は、下記に示す 3 つの方法に関して検討を行った。3 つの方法の水深の決め方を図-8 に示す。

a) 相田の方法

$$q = 0.5 h_0 \sqrt{g h_0} \dots\dots\dots (1)$$

b) 本間の方法

$$\left. \begin{aligned} q &= 0.35 h_1 \sqrt{g h_1} & (h_2 \leq 2/3 h_1) \\ q &= 2.6 h_1 \sqrt{g (h_2 - h_1)} & (h_2 > 2/3 h_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

c) 吉川の方法

$$q = \frac{2}{3} C \sqrt{2g} h_3^{3/2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 q : 流量, h_0, h_1, h_2, h_3 : 水深, g : 重力加速度, $C = 0.17$ である。

図-9 に護岸から 1.0 m の Ch21 で計測された水位およびレーザ流速計の値から流量換算した波形と、各越流式で計算した結果の比較を示す。本間の方法は実験より過大評価であり、吉川の方法は逆に過小評価となるのに対し、相田の方法は実験結果を最も良く再現する結果となった。

図-10 から図-13 に示した計算結果は、護岸での越流式に相田の方法を用いて、4 ケースに関して遡上域まで含めて計算した結果である。護岸前面において分裂を伴わないケース 1-A, 2-A は非線形長波方程式を用い、分裂を伴うケース 1-B, 2-B は、海域ではブシネスク方程式、遡上域では非線形長波方程式を用いて計算を行った。計算は護岸前面での分裂や非分裂にかかわらず、実験結果を良く再現できている。また、図-14 および図-15 に、中型水路のケース 1-A, 1-B の Ch21 における流速値を示す。いずれも実験結果を比較的良く再現していることがわかる。

(3) 波力時系列の試算

海岸堤防のように汀線より陸側にある直立壁に作用する波力に対しては、富永・久津見 (1971) が三角形分布を仮定して求めた算定式がある。著者らも実用的な波圧

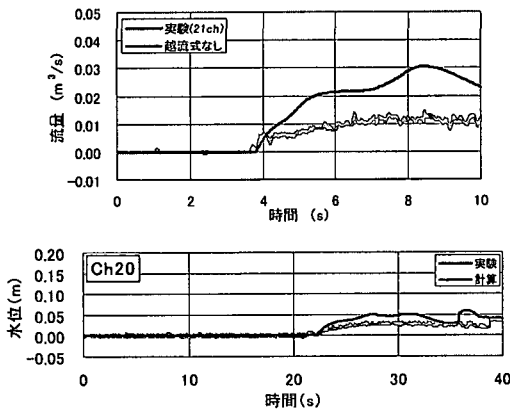


図-7 越流量および水位時系列の比較 (ケース 1-A)

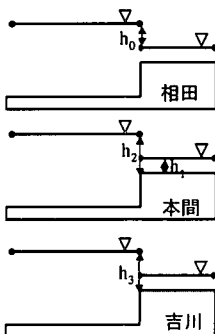


図-8 各越流式概念図

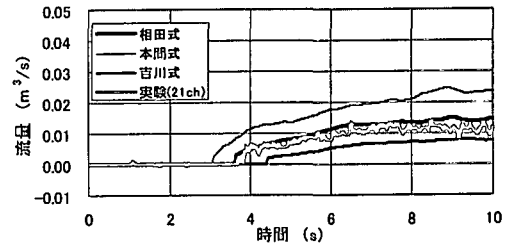


図-9 各越流式と実験の比較

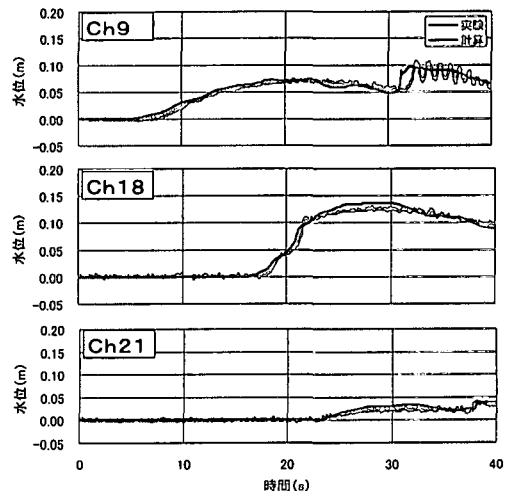


図-10 非分裂波の水位時系列 (ケース 1-A)

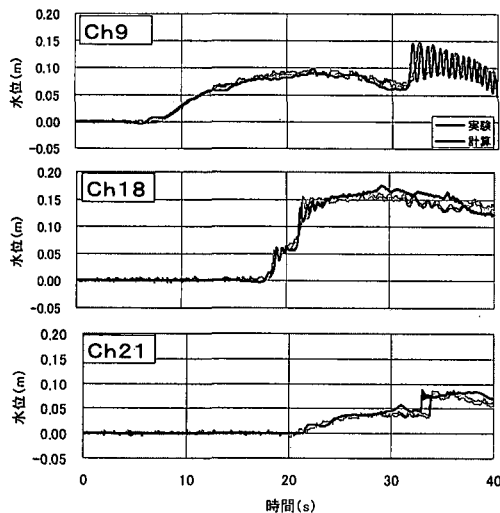


図-11 分裂波の水位時系列 (ケース 1-B)

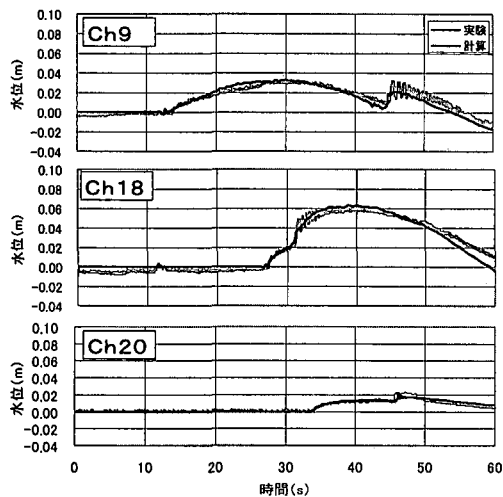


図-12 非分裂波の水位時系列 (ケース 2-A)

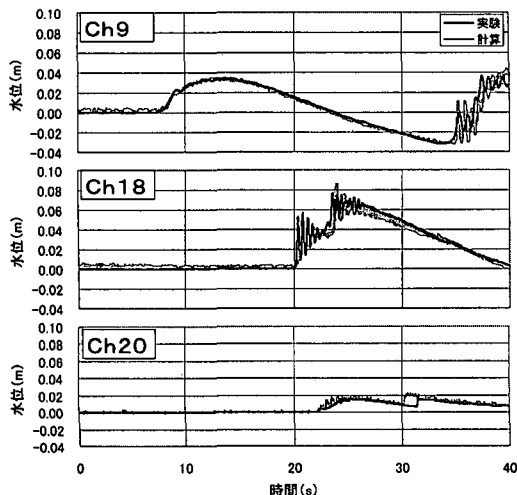


図-13 分裂波の水位時系列 (ケース 2-B)

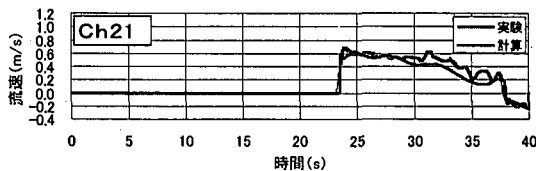


図-14 非分裂波の流速時系列 (ケース 1-A)

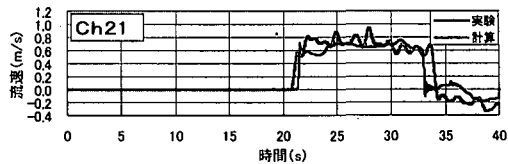


図-15 分裂波の流速時系列 (ケース 1-B)

算定式として、三角形分布で近似した最大波圧算定式を朝倉ら (2000) で提案している。このように、波力評価については、設計では静的に取り扱うことが一般的かつ実用的と考えられるが、今回の実験では波圧の経時変化も計測しているため、遡上計算により得られた水位と流速を用いて波力時系列の算定を試みた。構造物に作用する全水平力は、構造物背後の渦によって生ずる抗力と、圧力勾配によって生ずる力ならびに構造物の存在によって生ずる力の慣性力の線形和で表現されるモリソン式を波力算定方法として準用することとした。さらに、衝撃波や構造物前後における水位差を考慮できるように水平波力 F は、モリソン式を修正し、4 成分 (第 1 項：抗力、第 2 項：慣性力、第 3 項：衝撃力、第 4 項：動水勾配力) の合力として評価した。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D u |u| B \eta + \rho C_M \ddot{u} B L \eta + \frac{1}{2} \rho C_s(\theta) u |u| B \eta + \rho g B L \eta \frac{d\eta}{dx} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ρ ：水の密度、 u ：流速、 $\ddot{u}$ ：加速度、 L ：構造物の奥行き、 g ：重力加速度、 B ：構造物の幅、 η ：遡上水深、 C_D ：抗力係数 (=2.05)、 C_M ：質量係数 (=2.19) である。

衝撃力における衝撃力係数 $C_s(\theta)$ は、構造物前面の波高と隣り合う沖側地点の水位から波面の角度 $\tan \theta = d\eta/dx$ を算出し、 $C_s = 3.6 \tan \theta$ とした。動水勾配力における遡上水深は、構造物により完全重複波になるとの仮定をして、構造物前面での遡上水深を 2 倍にした。実験では、構造物模型 (幅 0.25 m) を大型水路 (幅 2 m) の中央に設置して波圧を計測しているが、計算では構造物がない状態を対象とし、構造物設置位置における水位と流速の計算結果を用いた。

図-16 に修正モリソン式により算定した護岸から 50 cm 地点 Ch20 における非分裂波の波力時系列を示す。進行波に関する波力の再現性は良好であるが、波力が反転

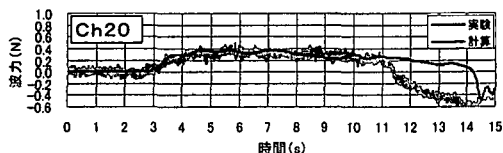


図-16 非分裂波の波力時系列 (ケース 2-A)

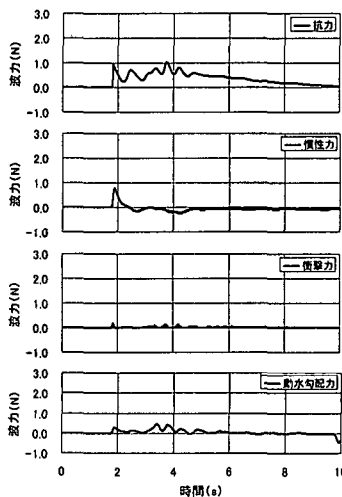


図-17 波力算定式中の各項の波力 (ケース 2-B)

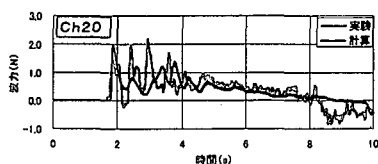


図-18 分裂波の波力時系列 (ケース 2-B)

する時間帯は、計算では再現できていない。

図-17 は分裂しているケースの波力を各項毎に示した結果であり、図-18 はこれらの合計値を実験結果と比較した図である。ソリトン分裂して遡上した波の1波目の値は抗力と慣性力、4秒以降の緩やかな部分の波力は抗力により評価されており、実験結果を概ね再現している。2波目以降の波力は、周期的な特徴は捉えているが値は過小であり、また非分裂波の結果と同様に、波力の反転する時間帯を再現できていない。

修正モリソン式を用いることにより、分裂波の波力時系列評価には若干課題が残ったが、非分裂波の進行波による波力の時系列評価は概ね再現可能である。また、今回の実験に用いた構造物は立方体であり、構造物による流れ場への影響は大きいものではない。海岸堤防のように流れに直角方向幅が長く、流れ場への影響が大きい構造物に対する検討が今後の課題として残されている。

4. まとめ

直立護岸を越流し遡上する津波を対象とし、水理模型実験の再現計算を行うことにより、水位・流速場の再現および波力の試算に関して以下に示す結果を得た。

- ①直立護岸における遡上域では、海域での分裂・非分裂にかかわらず、非線形長波方程式が適用可能であることを確認した。
- ②直立護岸における遡上現象に対し、越流式として相田の方法を適用することにより、非分裂波および海域で分裂、砕波を伴うような波の遡上を再現することができた。
- ③構造物による流れ場への影響が大きなものでない条件下において、修正モリソン式により波力時系列の試算を行った結果、非分裂波の進行波に対しては再現できた。ただし、分裂波の時系列評価の精度向上および流れ場に大きく影響を与えるような構造物に対する適応性が今後の課題である。

今後は、モリソン式中の諸係数の妥当性を含め各種構造物条件に対する実験データとの比較検討を実施し、精度の向上を図る予定である。

謝辞：本研究を進めるに当たり、東北大学災害制御研究センター 今村文彦助教授、電力中央研究所 田中寛好 好席研究員、池野正明主任研究員、松山昌史主任研究員より貴重なご指導を頂いたことを記して謝意を表します。

参考文献

- 相田 勇 (1977): 陸上に溢れる津波の数値実験—高知県須崎および宇佐の場合—地震研究所報 Vol. 52, pp. 441-460.
- 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, pp. 911-915.
- 岩崎敏夫・真野 明 (1979): オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.
- 荻原國宏 (1986): 流体力, 新体系土木工学, 25巻, p. 58.
- 金山 進・清水琢三・磯部雅彦 (1994): プシネスク方程式を用いたサーフビート・水位上昇の平面二次元計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 61-65.
- 佐藤慎司 (1995): 波の分裂と砕波を考慮した津波の数値計算, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 376-380.
- 佐藤慎司・Michael Kabiling (1993): Boussinesq 方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 386-390.
- 宮永正照・久津見生哲 (1971): 海岸堤防へ作用する砕波後の波圧, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 215-221.
- 藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進 (1996): 津波の流速計算に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 291-295.
- 松宮英夫・飯塚秀典 (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.