

津波遡上高の推定に関する実験的研究

松山昌史*・池野正明**・田中寛好**

1. はじめに

津波に対する防災及び海岸構造物の安全性を評価する上で、遡上高の予測は重要である。近年、実際に発生した津波の再現を目的の中心として、実海底地形上での波源域も含めた津波伝播の数値シミュレーションが行われるようになり、多くの成果をあげてきた。また、日本海中部地震津波以降、現地調査などが迅速かつ広範囲に行われるようになり、詳細な遡上高分布が得られている。これらの数値計算と実測の遡上高分布を比較すると、数 km 以上のオーダーの分布形状については十分に再現性が高い。しかし、ミクロ的に各地点毎の遡上高について数値計算と実測を比較すると、その比が数倍や数分の一になる場所があることも認められる。この原因としては地形や海岸線の再現性や計算格子幅など多くの要因が絡み合っていることが予想される。その中の一つとして、海岸線における陸側での境界条件の設定方法も挙げられる。境界条件の種類としては、ある水深に無限の鉛直壁があるとして行う簡易な方法と非線形理論に基づく遡上計算を行う方法の 2 種類におおまかに分けられる。これまでの数値計算では、扱い容易さや計算効率等の面から鉛直壁の条件を利用する例がどちらかといえば多いが、ミクロ的な遡上高の推定誤差がどの程度あるのかという観点からは十分に議論されていない。よって、海岸構造物の設計をするため、数値計算モデルの選定をするときに、境界条件の選択に明確な基準がない。

そこで本研究では大型水路において緩勾配地形を作成して長周期波を発生・伝播させて得られた水位変動、遡上高等の実験データを基に、数値計算における遡上高の定量的な評価という観点から考慮すべき現象や波の条件について検討した。

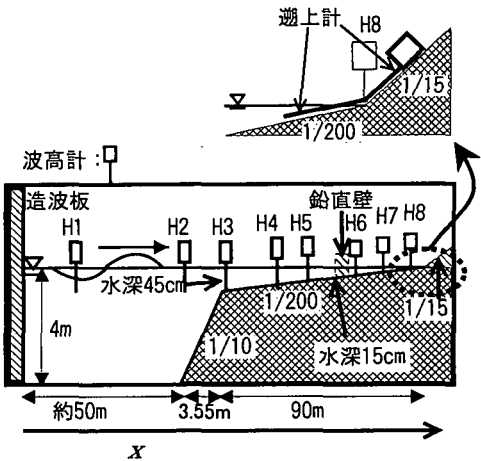
2. 実験内容

2.1 実験装置概要

実験は長さ 205 m、幅 3.4 m の大型造波水路で行い、図一 1 に示すように 1/10 と 1/200 の斜面を設置、また汀

線から遡上域は 1/15 勾配の斜面とした。縮尺は 1/100 を想定している。1/200 斜面の長さは 90 m あり、実規模では 9 km 程度の大陸棚が外洋に突出している遠浅の海岸とみなすことができる。水深 4 m に設置されたピストン型造波機により正弦波形で周期 20, 40, 60, 100 秒(実周期で 3.3, 6.7, 10, 16.7 分)の波を造波波高 2 cm~20 cm (造波振幅は 1 cm~10 cm) の範囲で押波初動と引波初動それぞれ 1 周期のみ造波し、容量式の波高計と遡上計により水面変動を測定した。容量式波高計は図一 1 と表一 1 に示すように 10~20 m 間隔で設置した。遡上計は遡上時の浸水高さを測定するために、汀線付近の岸沖断面地形と平行に高さ 2 cm で、容量線を 3 本 (85 cm 間隔) はわせたものであり、岸沖方向にそれぞれ 4 m づつ伸ばした。よって、各容量線は地形に沿って汀線付近で折れ曲がっており、約 -0.02 m~+0.26 m の範囲の遡上及び引波先端の位置と高さを記録することができる。

さらに、防波堤による波の遮蔽効果を検討するために、



図一 1 実験の概要

表一 1 波高計の位置と設置水深

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
位置X (m)	20	60	80	110	130	150	160	170
水深(m)	4.0	2.45	0.45	0.3	0.2	0.1	0.05	0.0

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部
** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部

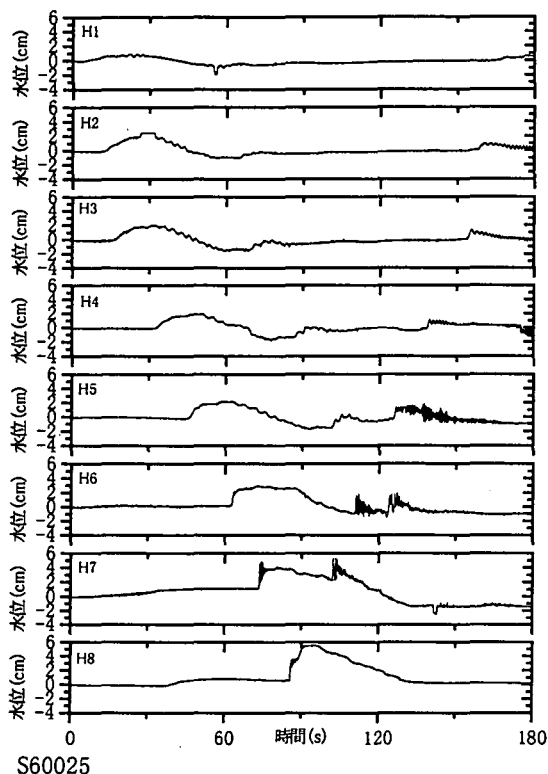


図-2 押波初動時の各波高計での水位変動

水深 0.15 m の地点に水路の両側から壁に鉛直に防波堤を設け、その開口幅を 1.33 m (40%), 1 m (30%), 0.67 m (20%) と変化させて、遡上高の変化を調べた。

3. 実験結果

3.1 波形の変形に関して

図-2 に押波初動の周期 60 秒、造波波高 3 cm のケースの、波が斜面上を進行する場合の浅水変形を示す。今回の実験では 1/200 と緩勾配であるために、ほとんどのケースで波高増幅、波形の前傾化、先端での分裂、砕波という過程を経て、遡上域に達する。ここに示したケースでは沖から伝播した波が、遡上後に反射した後に、沖へ伝播していく様子が確認された。水深 0.05 m (H7, 実規模水深 5 m) では波の分裂が認められ、そこから遡上域で砕波しながら遡上する。また、水深 0.05 m では遡上するときに反射波が沖へ帰っていくとき、1つの押波で水位のピークが2回現われている。緩勾配の浅海域では沖から来襲する津波だけではなく、岸から反射してくる津波による水位上昇に注意する必要があるようである。

3.2 押波初動と引波初動による遡上高の違い

図-3 に周期 60 秒造波波高 3 cm における引波初動時の波の伝播を示す。引波初動のケースにおいては、押波による水位上昇は遡上域も含めて、押波初動のケースと

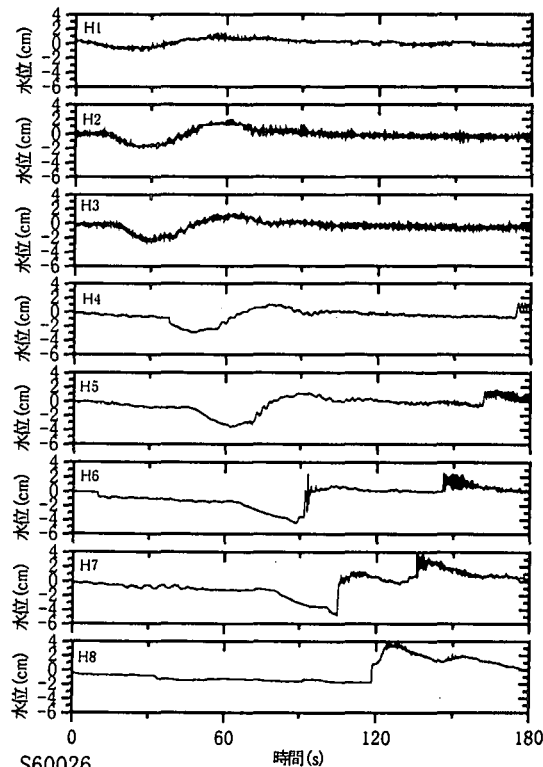


図-3 引波初動時の各波高計での水位変動

比較して小さくなる。これは、押波が浅海域を遡上するときに、先行する引波によって 1) 静水位以下に水位低下していること、及び 2) 沖側への流れが発生していることにより、底面摩擦や冲向きの流れの影響を受けやすく、その結果、前傾化から砕波する地点がより沖側へ移動する。この結果、押波が遡上域に達するまでのエネルギー損失が大きいためである。図-4 に押波初動時の遡上高 R と引波初動時の遡上高 R_B の比を示す。このように引波初動時の遡上高は押波初動時と比較して小さくなり、ばらつきがあるものの、その比は平均すると約 0.65

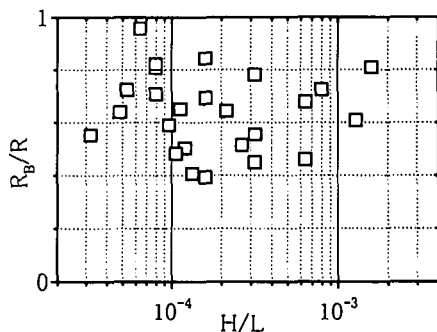


図-4 押波初動と引波初動の違いによる遡上高比

である。

また、水深 0.05 m (H 7, 実規模水深 5 m) 地点で水位が最も高くなるのは、押波が陸上遡上に後、反射していくときである。これは先行する引波の影響で押波の砕波点が沖にシフトし、押波の第一波が来襲する時には既に砕波により減衰しているためである。

3.3 遡上高に対する波形勾配の影響

富樫ら (1975) は図-5 に示すように一様水深に斜面 (1/20, 1/40, 1/50) が接続した断面地形において、入射した波の遡上高について実験を行い、一様水深上での波形勾配と相対遡上高 (遡上高 R /一様水深上の振幅 H) について検討している。図-6 に 1/40 勾配斜面での富樫らの実験式を示す。それによると、非砕波領域では波形勾配が大きくなるにつれて、相対遡上高は大きくなるが、砕波領域に入るあたりでピーク値を取り、そこからは波形勾配が大きくなるに従い、相対遡上高は小さくなる。

本実験で得られた水深 4 m (実水深 400 m) での波形勾配と相対遡上高の関係を図-7 に四角の点で示す。波形勾配が大きくなるにつれて相対遡上高が小さくなる傾向にあり、波形勾配は $2 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-3}$ と小さいものの、砕波領域にあたるものと考えられる。図-7 の実線は線形回帰によって得られた実験式であり、以下のように表される。

$$\frac{R}{H} = 0.114 \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.429}$$

次にこれらの水深 4 m での振幅と波長を線形理論に

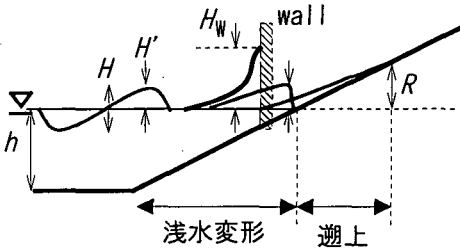


図-5 浅海における波の変形の模式図

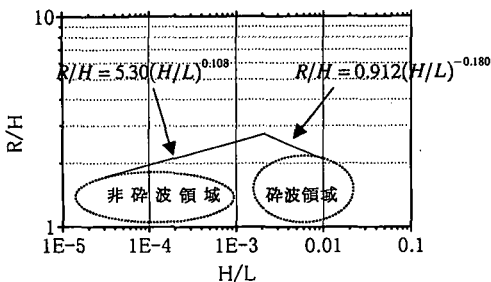


図-6 富樫による実験式

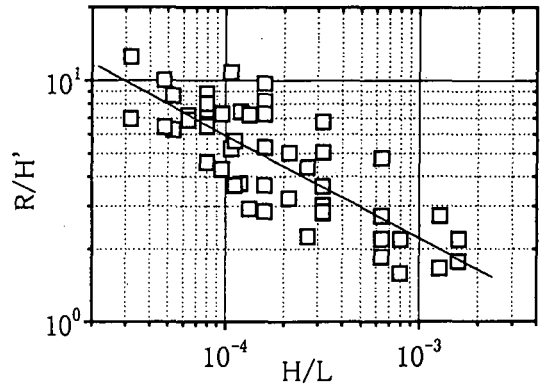


図-7 造波時の波形勾配と相対遡上高

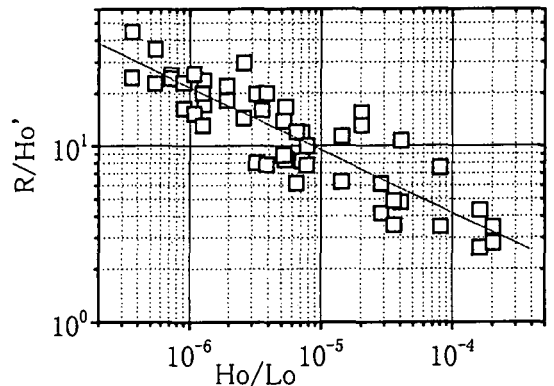


図-8 仮想的な深海条件での波形勾配と相対遡上高

基づき深海波に換算して整理したものが図8である。深海波の条件とすると、例えば実規模で周期 10 分の波の深海波条件は水深 800 km 以上になり、地球上の海ではありえない仮想的な深海波であることを記しておく。深海波に換算した結果、パラツキが図-7 と比較して若干小さく、本実験の範囲では相対遡上高が沖波波形勾配でさらに統一的に表現できそうである。実線で示されているのが線形回帰によって得られた実験式であり、以下のように表される。

$$\frac{R}{H_0} = 0.154 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.358}$$

このようにこれまでに得られた実験結果についても、同様の仮想的な深海条件での波形勾配で整理することにより、パラツキを小さく整理できる可能性があることを示した。

3.4 陸地の境界条件の違いによる遡上高の検討

陸上境界において遡上計算を行わずに鉛直壁が存在するとして遡上高を評価するということは、図-5 に示す壁面での最大水位 H_w が遡上高に等しいとすることである。ここでは、その妥当性を検討する。

鉛直壁面での反射率は1であることから、水深0.1m(実規模で10m)での進行波による水位上昇高を2倍した値を H_w と考えることができ、それと遡上高との比 R/H_w を図-9に示す。横軸は仮想的に換算した沖波波形勾配 H_0/L_0 であり、周期20秒から100秒までの全ケースを含んでいる。波形勾配が 7×10^{-6} を越えると、ばらつきはあるものの R/H_w はほぼ1前後にプロットされ、最大でも1.5以下である。しかし、波形勾配の小さいケースではその値の幅は広く、最大3程度となる。 R/H_w が1付近にのみ分布するのであれば、陸上境界での壁境界条件が

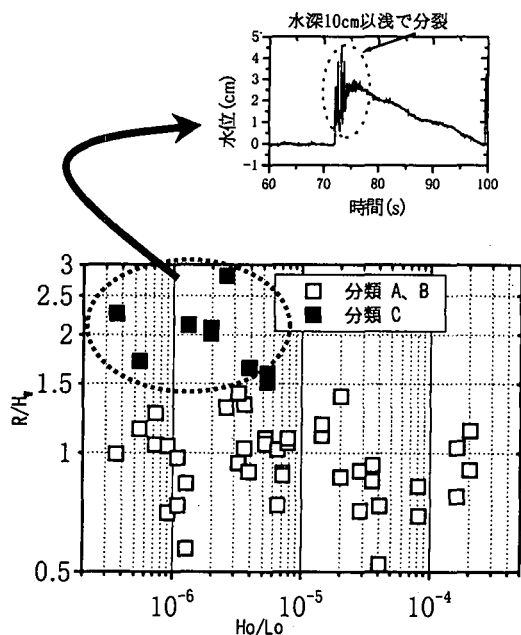


図-9 鉛直壁条件の妥当性

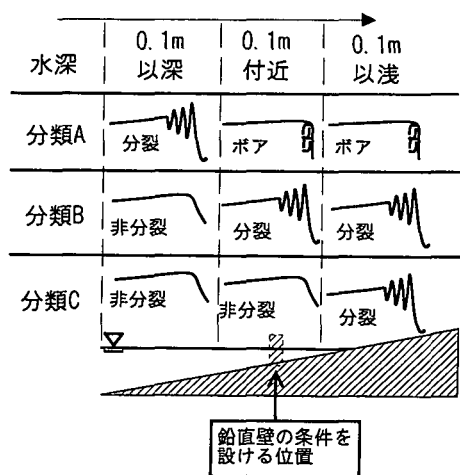


図-10 鉛直壁設置位置付近での長波挙動の分類

妥当であるということになるが、波形勾配が 7×10^{-6} 以下では、この仮説は成り立たず、壁境界条件が遡上高を過少評価する可能性があることが明らかになった。次にこれらの各ケースで水位の時間波形を検討し、図-10のように分裂及び砕波位置によって分類した。水深0.1mより深い場所で分裂・砕波して、ポア上になった波が伝播して遡上するケースをAに、水深0.1mで分裂しており、砕波しながら遡上するケースをBに、水深0.1mでは分裂せず、その後に砕波・遡上するケースをCと分類した。 R/H_w が2以上になるのは図-9に示すよう分類Cのケースである。このケースでは、水深0.1m以浅で、分散効果により波が分裂して、それに伴って波高が増幅し、遡上高に影響しているためと解釈できる。長島(1974)によると分裂を伴う波先端での波高増幅により、段波波高の2倍以上の波高を示す実験例や計算例が示されている。このように緩勾配地形上の遡上高の評価において、分散効果による波高増幅は沖波波形勾配が小さい場合に無視できないことがある。本実験においてその範囲は H_0/L_0 が 7×10^{-6} 以下である。

このように緩勾配上を遡上する津波の遡上高を精度よく評価するには、波の分裂や砕波を取り扱えるモデルが有効と考えられる。例えば、佐藤(1995)が行ったような砕波も取り込んだモデルが考えられるが、このモデルで遡上計算は行っておらず、今後の進展が期待される。

4. 防波堤による津波の遮蔽効果

防波堤に波が伝播すると、波の一部が反射され、開口部を通り抜けた波が遡上する。波形勾配の大きな部分が開口部を通過するときには、開口部付近で大きな渦の発生が見られた。開口率20%における進行波(周期60秒、造波波高4m押波初動)の最大水位の伝播に伴う変化を図-11に示す。防波堤の遮蔽効果により、防波堤設置位置より岸側では、最大水位が減少し、その後再び浅水変形を行い、最大水位が汀線に向かって大きくなる。

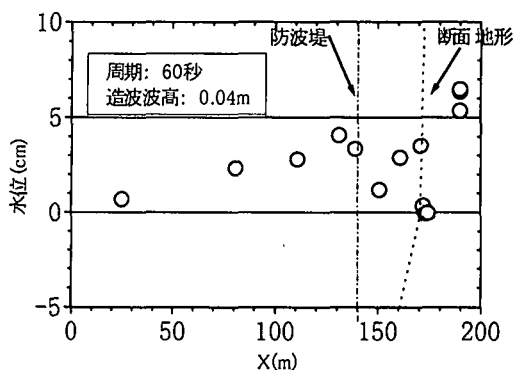


図-11 防波堤を設置した場合の最大水位の分布

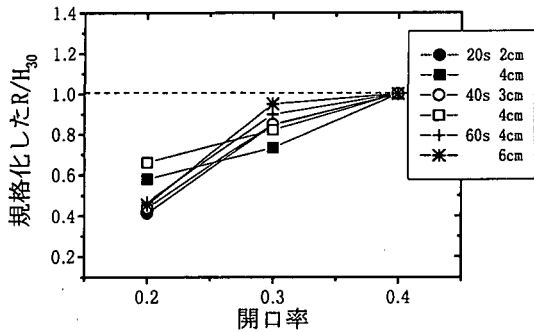


図-12 開口率の変化による相対遡上高

水深0.3mでの最大水位 H_{30} に対する遡上高の比 R/H_{30} を各開口率毎に算出し、さらに開口率40%の R/H_{30} で規格化したものを図-12に示す。このように開口率の増加に伴い、遡上高も大きくなる傾向にあるという、直感的な結果となった。但し、防波堤を通過した波が再び浅水変形を行うので、条件によっては開口部の大きさと遡上高が逆転する可能性もある。すなわち、開口部が大きい場合でも、そのために顕著な碎波が発生して大きなエネルギー逸散により、遡上高が小さくなる可能性がある。また周期の違いによる変化もみられなかった。これは、波の波長と比較して、開口幅や水路の幅が十分に小さいためであろう。

5. ま と め

- 実験により緩勾配 (1/200) 上での種々の長波を発生させて、水位変動及び遡上高を測定し、以下の結果を得た。

- 押波の遡上に対して、それと同規模の引波が先行している場合には、引波によって浅海域での水位上昇や遡上高が抑制される。
- 1/200 勾配上での相対遡上高に対する波形勾配の影響を検討し、本実験は富樫ら (1975) の分類によると碎波領域に属する。
- 長波の相対遡上高について、仮想的な大水深 (数 100 km 以深) での深海波を想定して、相対遡上高と深海での波形勾配で整理することを提案し、周期の違いも取り込んだ、実験式の算出方法を示した。
- 浅海域において、ある水深での進行波の最大水位と遡上高を比較することにより、数値計算でよく用いられる鉛直壁境界条件について考察し、汀線近傍において分裂や碎波といった非線形性と分散性が有意な場合には、線形長波理論で境界条件に鉛直壁を用いる方法や浅水理論に基づく遡上計算では遡上高が過小評価になる可能性のあることを示した。

参 考 文 献

- 富樫宏由・中村武弘 (1975): 津波の陸上遡上高に関する実験的研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 371-375.
- 富樫宏由・中村武弘 (1975): 津波の陸上遡上高に関する実験式の再検討(続): 第 30 回年次学術講演講演概要集, 第 II 部門.
- 鶴谷広一・中野晋・一戸秀久 (1984): 浅海における津波の変形と遡上に関する実験的研究—1983 年日本海中部地震津波の検討—, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 237-241.
- 佐藤慎司 (1995): 波の分裂と碎波を考慮した数値計算, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 376-380.
- 長島秀樹 (1974): KDV Soliton とその応用, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 49-54.