周期の長い津波の遡上・反射に伴う ソリトン分裂特性に関する数値実験

A NUMERICAL EXPERIMENT ON CHARACTERISTICS OF SOLITARY WAVES
ON RUNUP AND REFLECTION OF LONG PERIOD TSUNAMI WAVE

平山克也¹・高山知司²

Katsuya HIRAYAMA, Tomotsuka TAKAYAMA

¹正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²フェロー 工博 (財) 沿岸技術研究センター技術研究所 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

It was reported in model experiments that the tsunami wave penetrated to very shallow water area is dispersed to solitary waves. A long period tsunami wave, however, cannot be generated in a usual experimental flume due to limitation of flume length or hydraulic scale effect. In this paper, the numerical experiments using a Boussinesq type wave transformation model are conducted to observe the deformation of the long period tsunami wave on a slope or a step reef.

The numerical experiments have shown that solitary waves dispersed in front of long period tsunami wave start to appear at the small depth on the slope and grow up on the step reef. The solitary waves in front of the reflected long period tsunami wave also grow up on the slope with negative gradient.

Key Words : Solitary wave, wave dispersion, wave runup, numerical experiment, long period tsunami wave

1. はじめに

断面水路を用いた津波の変形・遡上に関する実験的研究などにより、浅海域を伝播した津波はソリトン分裂により短周期化し、砕波による衝撃波圧を伴って防波堤や護岸に來襲する危険性が指摘されている。¹⁾しかし、例えば東南海地震で想定される周期 50min 程度の津波の遡上変形を対象とした場合には、造波水路長や縮尺効果等の制約のために、その変形特性を模型実験によって確認することは非常に困難である。本研究では、ソリトン分裂と砕波を伴う津波の変形計算に対してその適用性が検証されたブシネスクモデル NOWT-PARI²⁾を用いて、一様斜面やステップ地形を遡上する周期の長い津波の変形計算を行い、得られた水位・流速の時間変動をもとに、ソリトン分裂波の発生・発達メカニズム、及びそれらによる圧力変動について考察を行った。

2. 計算条件の設定

東南海地震により関東から西日本に至る太平洋岸及び瀬戸内海沿岸への來襲が想定される津波のうち、比較的勾配が緩く、浅水変形による波高増大やソリ

トン分裂波の発生が懸念される勾配 1/230 の斜面地形に面した地域に來襲する周期 50min、片振幅 3m の津波³⁾の遡上変形計算を実施し、設定した数値水路長(約 10~16km)よりもはるかに長い津波(入射境界での波長 63km)の遡上・反射に伴い発生・発達するソリトン分裂波を数値実験により観察した。また比較のために、片振幅 4m としたケースも合わせて実施した。入射境界の水深はソリトン分裂波に対して十分浅い 45m とし、それより沖側にはゾマーフェルドによる放射条件を適用して、斜面や岸側端で反射された津波基本波に対する透過境界を設定した。一方、岸側にはそれぞれ、①遡上境界(斜面勾配 1/230)、②ステップ地形(水深 5m、岸側端は津波基本波に対する透過境界)、③直立壁(水

図-1 数値水路の概要と水位・流速の観測地点

深 5m) を設定した。また差分条件は、通常周期 6～8s の風波に対して設定される $\Delta x=5\text{m}$, $\Delta t=20\text{ms}$ とした。なお、透過境界に短周期成分を消波するためのスポンジ層は設置していないので、計算領域内の浅い海域(岸側)で発生した沖へ進むソリトン分裂波は消波されない。また入射境界では、沖へ伝播したソリトン分裂波による計算の不安定化を防ぐために、分散項を除いて造波した。これらの数値水路の概要を水位・流速・圧力変動の各観測地点(ch1～20)とともに図-1 に示す。

3. 津波変形の計算結果

(1) 一様斜面上の津波変形

片振幅 3m, 周期 3000s の津波を造波し、各地点で得られた 2 周期間の水位変動と流速変動の計算結

果を図-2 に示す。一様斜面上の津波変形では、津波先端が斜面を遡上する際にソリトン分裂が見られ、とくに第 1 波の引き波による水位低下時に遡上する第 2 波では、第 1 波に比べより沖側でソリトン波が生じるが、遡上に伴い碎波減衰するためにその発達は見られない。また遡上域(第 1 波では ch13～ch15, 第 2 波では ch10～ch15)における流速変動をみると、段波状に遡上する水面波形に伴って岸向き流れが急激に発生していることがわかる。

津波第 1 波先端で発生するソリトン波の波形をより詳細にみると、ソリトン分裂は水深 $h=5.0\text{m}$ の ch12 地点と $h=0.65\text{m}$ の ch13 地点の間で発生している。ただしその周期は通常のソリトン分裂波と比べかなり短く、初期遡上時に遡上モデルによって発生する数値振動の影響が少なくないと考えられる。

一方、津波第 2 波先端では、水深 $h=10.2\text{m}$ の ch10 地点と $h=5.9\text{m}$ の ch11 地点の間でソリトン分

図-2 一様斜面上の津波変形(片振幅 $a=3\text{m}$, 津波周期 $T=3000\text{s}$)

裂が生じている。ch11 の水位変動をみると、3300s までは静水面より約 6m 下がったレベルでほぼ一定で、その後急激に上昇していることから、少なくとも ch11 地点では、第 1 波が引いた後第 2 波が遡上するまで海底面が露出していたと考えられるが、第 1 波遡上時にみられたような数値振動は発生していない。これは、第 2 波の遡上時において計算格子の水陸判定を行う際の初期値が更新されており、遡上計算がより滑らかに行われたためと考えられる。

同様に、片振幅 4m、周期 3000s の津波を造波したところ、津波先端が斜面を遡上する際にソリトン分裂がみられるのは片振幅 3m のときと同様であるが、片振幅 4m とした津波第 2 波の遡上時には、片振幅 3m としたときよりもさらに沖側でソリトン分裂が生じた。しかし、岸への伝播に伴ってソリトン波が発達する様子はやはりみられなかった。

これらのソリトン分裂は、いずれも前傾化した津

波波形前面で高周波数成分が卓越し、非線形効果と分散効果の相互干渉により生じたものと考えられるが、津波基本波の波長が非常に長いために、津波波形先端部のみが分裂することは非常に興味深い。

(2) ステップ地形上の津波変形

周期 3000s の津波造波後 2 周期間の各地点における水位変動と流速変動のうち、片振幅 3m としたケースを図-3 に示す。ステップ地形（水深 $h=5\text{m}$ ）上の津波変形では、とくに第 1 波においてステップ上を進行する津波先端でソリトン分裂波が生じ、伝播に伴い次第に発達する様子が計算された。また片振幅が大きいほど早くソリトン分裂が生じ、片振幅 3m のとき ch13 地点と ch14 地点の間（ステップ地形沖側端からの距離：1000m～2000m）であるのに対し、片振幅 4m としたケースでは ch12 地点と ch13 地点の間（ステップ地形沖側端から 1000m 以

図-3 ステップ地形上（水深 $h=5\text{m}$ ）の津波変形（片振幅 $a=3\text{m}$ 、津波周期 $T=3000\text{s}$ ）

内)で分裂が生じていた。

一方、ステップ上を進行する津波第2波の先端では、瞬間的に大きな振幅が現れる様子が計算された。この発生機構として本研究では、ステップ地形前面の斜面上で発生したソリトン波がステップ上で重畳したものと推測している。すなわち、ステップ地形先端に位置する ch12 地点の流速変動をみると、津波第2波が遡上してくるまで冲向きの強い定常流れが発生していることがわかる。この流れを遡る津波第2波の波長は見かけ上縮められ、津波先端においてソリトン波が重畳し、大きな振幅が発生したと考えられる。

(3) 一様斜面上の津波の重複変形

周期 3000s の津波造波後 2 周期間の各地点における水位変動と流速変動のうち、片振幅 3m としたケースを図-4 に示す。岸側端(水深 $h=5\text{m}$)の直立

壁により形成される津波の重複波形では、第2波の反射波先端で反射直後から冲向きのソリトン分裂波が発生し、発達しながら沖へ伝播する様子が計算された。これは、津波先端の遡上と同時に非常に幅広の重複波の腹が形成されるために、見かけ上の水位が上昇し、岸向きのソリトン分裂が生じなかったことに加え、反射波先端が入射波による岸向き流れを“遡る”ために高周波成分が卓越し、ソリトン分裂が生じやすくなったためと考えられる。なお、片振幅 4m とした計算結果でも同様な傾向が観察された。

津波反射波に伴い冲向きに進行するソリトン波の波形をみると、沖へ伝播するにつれて水深が増加し、個々のソリトン波の波長が長くなっていることがわかる。なお片振幅 3m のケースに比べ片振幅 4m のケースでは、津波第2波の反射波に伴うソリトン分裂波の振幅が大きく、また津波第1波の反射波においてもソリトン波が発生・発達していた。

図-4 直立壁を有する斜面上の重複波形 (片振幅 $a=3\text{m}$, 津波周期 $T=3000\text{s}$)

4. 津波による圧力変動の計算結果

(1) 一様斜面上の津波による圧力変動

一様斜面上の ch12 地点 ($h=5\text{m}$) を通過する津波による深さ $d=0.9h$, $0.5h$, $0.1h$ での水圧変動を図-5 (a) に示す。この地点において津波第1波の遡上時にソリトン分裂波は発生していないため、各深さの水圧変動は津波の遡上による水位上昇に伴い静的に変化している。一方、ソリトン分裂波が生じている津波第2波による水圧変動は、ソリトン波の遡上による水位変動に伴い、水位上昇に応じて深いほうから順に動的に変化している。しかし、これらの振幅は後に続く静的な水圧変動幅に比べ十分小さく、また水位変動でみたように、遡上に伴いソリトン波が発達する様子もみられないため、斜面上に設置される構造物の設計にこれらの影響を考慮する必要性は小さいと考えられる。

(2) ステップ地形斜面上の津波による圧力変動

ステップ地形上の ch14 地点 ($h=5\text{m}$) を通過する津波による深さ $d=0.9h$, $0.5h$, $0.1h$ での水圧変動を図-5 (b) に示す。この地点において、津波第1波の遡上時にはソリトン分裂波が発達しながら伝播しているため、各深さの水圧変動は動的に変化している。なおこれらの振幅は深いほうから順に大きい。一方、

先端で瞬間的に大きな振幅が発生する津波第2波の遡上時には、各深さの水圧変動とも、その瞬間、大きな振幅が現れる様子が計算された。しかもこれらは、後に続く静的な水圧変動の極大値と同等またはそれ以上の水圧となっている。したがって、津波の引き波時に露出するようなリーフ上に構造物を設置する場合には、津波遡上時のこのような衝撃的な波圧にも十分配慮した設計が必要と考えられる。

(3) 一様斜面上の津波による護岸への作用波圧

一様斜面の岸側端に設置した護岸前面に位置する、ch12 地点 ($h=5\text{m}$) の深さ $d=0.9h$, $0.5h$, $0.1h$ で計算された水圧変動を図-5 (c) に示す。この地点において津波第1波の遡上・反射時にソリトン分裂波は発生していないため、一様斜面を遡上する津波と同様、各深さの水圧変動は重複津波による水位上昇に伴い静的に変化している。一方、津波第2波の反射波先端でソリトン分裂波が生じているときの水圧変動は、これらの水位変動に応じて深いほうから順に、動的に変化している。これらの振幅は後に続く静的な水圧変動幅に比べ十分小さいが、水位変動でみたように、反射波先端のソリトン波は沖への伝播に伴い次第に発達するため、浮体や係留船舶の挙動や係留力など、周期的な波圧変動が問題となる構造物を沖に設置する場合などには注意を要する。

図-5 津波による圧力変動 (片振幅 $a=3\text{m}$, 津波周期 $T=3000\text{s}$)

5. おわりに

本研究において判明した事項を整理すると、およそつぎのようである。

- 1/230 勾配斜面を遡上する周期 3000s の進行津波では、第 1 波の引き波による水位低下のために、津波振幅が大きいほど第 2 波の遡上時に岸向きのソリトン波が発生しやすくなるが、遡上に伴い砕波減衰するためにその発達はみられない。また、このような斜面上に設置される構造物の設計に影響を与えるほどの動的な圧力変動は生じなかった。
- 1/230 勾配斜面に接続したステップ地形を遡上する周期 3000s の進行津波では、ステップ上で進行する津波先端でソリトン分裂波が生じ、伝播に伴い次第に発達する。さらに津波第 2 波の遡上時には、第 1 波の引き波により形成された沖向きの定常流れのために見かけ上波長が縮められ、ステップ前面の斜面上で発生したソリトン分裂波が重畳し、津波先端で瞬間的に大きな振幅が発生する。このとき生じる各深さの水圧は、後に続く静的な圧力変動の極大値と同等またはそれ以上であるため、リーフ上に設置される構造物の設計においては、このような衝撃的な波圧の作用にも十分考慮する必要がある。
- 1/230 勾配斜面上に形成される周期 3000s の重複津波では、幅広の腹により見かけ上水位が上

昇するために、第 2 波の遡上時においても岸向きのソリトン波は発生しにくくなり、代わりに入射波による岸向き流れを遡る第 2 波の反射波先端において沖向きのソリトン波が発生しやすくなる。この反射波に伴うソリトン波は発達しながら伝播するので、浮体や係留船舶の挙動や係留力など、周期的な水圧変動が問題となるような構造物を沖に設置する場合には、注意を要する。

今後は、これらの数値実験等を通じて沿岸に来襲する津波諸元と斜面勾配等の関係を整理し、ソリトン分裂波の発生条件や、沿岸構造物に衝撃的な波圧が作用する危険性について明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 安田誠宏・高山知司・山本博紀：津波の変形および波力特性に及ぼす海岸断面地形の効果に関する実験的研究，海洋開発論文集，Vol. 22，pp. 529-534，2006.
- 2) 平山克也・高山知司・安田誠宏・平石哲也：ソリトン分裂と砕波を伴う津波の変形と作用波圧に関する数値計算，海洋開発論文集，Vol. 23，pp. 171-176，2007.
- 3) 中央防災会議東南海，南海地震等に関する専門調査会（第 14 回，第 16 回）配布資料，内閣府，2003.