003

粒子法を用いた遡上した津波による陸上構造物に対する作用力の評価

Evaluation of tsunami forces on structures using moving particle semi-implicit method

19WM6302 稲木 真奈美 Manami Inaki 指導教員 丸山 喜久 劉 ウェン

SYNOPSIS

A series of numerical analyses to estimate the water level and velocity of tsunami, and hydraulic force on structures was conducted using the particle semi-implicit method, and the results were compared with those of the hydraulic model experiments performed by Tomita et al. (2005) and those of the VOF method calculated by Arikawa et al. (2005). In this study, the wave height, hydraulic force on the structure, and flow velocity were calculated using the wave making plate which moves with different speeds. The different slopes in front of the structure were also assumed in the numerical simulation, and the obtained results were discussed with respect to the slope. The particle size was set to be 10 mm, and the speed of the wave plate was changed in time increments of 0.001 s. The accuracy of the numerical simulation is evaluated comparing with the results of the previous studies.

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震によって発生した津波により,太平洋沿岸の土木構造物が倒壊し,多くの被害が発生した.「防波堤の耐津波設計ガイドライン」¹⁾では,防波堤に作用する津波の水平力については汎用的に適用できる波力式はない.そのため,安定性照査手法も確立されておらず,水理模型実験や数値解析の結果などを用いて評価する必要がある.

現在, 津波による構造物への影響評価は, 水理模型実験 と VOF(Volume of Fluid)法における数値解析が行われるこ とが多いが, VOF 法では飛沫や水塊の分裂・合体の再現性 は十分に実証されていない. 粒子法は, 粒子を用いた連続 体の解析手法であり, 格子法に比べて離散化式が相対的に 簡単かつ格子間や接点間の関係性が不要で, 大変形を前提 とする解析に優位であるため, 近年では流体の解析に多く 用いられている²⁾. 建築・土木分野では, 主に構造物に対 する津波の波圧, 洗掘, 斜面崩壊や地すべり, 衝突などの 解析に用いられており, 大変形を前提とする解析に優位で あるが, その有効性, 妥当性の検証が十分に行われていな い.

そこで本研究では、粒子法の優位性、妥当性の検証を目 的として、遡上した津波の水位、速度、陸上構造物への作 用力について粒子法を用いた数値解析を行い、水理模型実 験の結果と VOF 法による解析の結果を比較した.本研究 で対象とした水理模型実験は富田ら³⁾によるもの、VOF法 の解析結果は有川ら⁴⁾によるものである.なお、粒子法の ソフトウェアには、非圧縮性流体を導入した MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法の Particleworks を使用した.

2. 解析条件

(1)使用した水路モデル

水理模型実験では全長 114m ほどの水路を, VOF 法では 全長 64m ほどの水路を用いている.本研究では,解析時間 短縮のため全長 34m の水路を作成して解析を行った.図1 に作成した水路モデルの断面を,図2に遡上域を示す.な お,遡上域については VOF 法のモデルと同様のものを使 用し,奥行きも同様に40mmとした.また,遡上域が下り 勾配のモデルの他に平坦のモデルを作成した.



図2 本研究で作成した水路モデルの遡上域

(2)造波モデル

本研究では、水理模型実験と同様にピストン式の造波板 を沖側から陸側に 20 秒かけて移動させることにより押し 波を発生させた.

(3)粒子径及び時間刻み

奥行が 40mm のモデルであることから,解析開始時に粒 子を3列以上配置できるよう粒子径は 10mm とした.時間 刻みは,造波板を動かすことによる粒子のすり抜けを防ぐ ために 0.001 秒とし,解析結果の出力間隔は 0.1 秒とした. 解析対象時間は、水路長が 34m で造波板を 20 秒間動かす ことから,構造物まで十分に波が伝わる時間を考えて 40 秒 とした.

(4)解析ケース

造波板の速度は複数設定した.造波板の速度の変更によ る解析ケースを表1に示す.

表 1 解析ケース	
ケース名	速度(mm/s)
ケース1	800×t
ケース2	700×t
ケース3	600×t
ケース4	500×t
t:時間(t≦20秒)	

3. 解析結果(勾配ありモデル)

水理模型実験, VOF 法による解析結果と本研究の解析結 果を比較する.まず,勾配ありモデルにて波高,作用力, 流速の比較を行った.なお,流速においては VOF 法による 解析結果がないため水理模型実験の結果のみとの比較とし ている.その中でも結果が良好に再現されているケースに ついて勾配なしモデルについても解析を行い,水理模型実 験と VOF 法による解析の結果と比較した.

(1)波高の比較

水理模型実験, VOF法の結果同様の地点での波高の結果 を比較する.図3に波高の計測地点を,図4に結果を示す.



図3 波高の計測地点

(a)の 0.0m 地点においては、全てのケースにおいて水理 模型実験値に近い波形になっている.最初の波のピークに 関しては、水理模型実験値の 360mm 程度に対し、ケース 1 で 450mm 程度、ケース 2 で 390mm 程度、ケース 3 で 320mm 程度、ケース 4 で 260mm 程度となり、ケース 2 とケース 3 が近い値となった.

時刻 5 秒以降の波高については,水理模型実験値が 300mmから350mm程度で,ケース3が300mmから330mm 程度であった.350mmから380mm程度のケース2よりも, ケース3の方が実験結果を良好に再現した.

(b)の-1.5m 地点においては、全てのケースにおいて時間 の経過とともに波高が大きくなっているが、水理模型実験 値は時間の経過とともに少しずつ小さくなっているので波 形の傾向は異なるものとなった.波高の値は、時刻4秒か ら8秒程度までは、ケース2が水理模型実験値と重なる部 分が多く良好に再現できているが、時刻8秒以降について はケース3が近い値となった.

(c)の-3.5m 地点においては,波高の上下が激しく形状は 近いものとなったが,水理模型実験では流入開始が時刻 4 秒程度であるのに対し,解析では全てのケースで時刻 5 秒 程度から流入開始という結果になった.その中でも,流入 開始は時刻 1 秒程度遅れているものの 8 秒程度まではケー ス 3 が比較的水理模型実験値と近い値になった.



(2)構造物に対する作用力の比較

水理模型実験, VOF 法による構造物に対する作用力の結 果を比較する.図5に構造物に対する作用力の計測区分を 示す.これは,水理模型実験の波圧計設置点である,高さ 0mm,42mm,107mm,152mmを基に,それぞれ高さ0mm, 40mm,100mm,150mmを中心とした支配幅を設定して区 分した.また,作用力については水理模型実験では衝撃波 圧と持続波圧で区分しており,VOF 法による解析結果では 特にそういった言及はされていないが,本研究においては 最大値と平均値とした.図6に結果を示す.なお,図6に おいて水理模型実験値の鉛直高さの最大が0.19になって おり,VOF 法による解析結果の鉛直高さの最大は0.1 ほど になっているが,原文ままとしている.



図5 構造物に対する作用力の計測区分

構造物に対する作用力は,水理模型実験(持続波圧)に 対してケース2(平均値)が最も近い値となり良好に再現 できている.

一方,水理模型実験(衝撃波圧)については,高さ 0.01m でケース3の値が近いものの,0.05m 付近で2/3 程 度,0.11m 付近で1/3 程度の値となっている.高さ0.05m 付近ではケース2の値が比較的近いものの,0.01m 付近で は1.3 倍と過大で,0.11m 付近では半分程度と過小な結果 となった.



(3)流速の比較

流速については VOF 法による結果がないので,水理模型 実験の結果同様の地点での流速の結果を比較する.流速の 計測地点は,図7に示すように-1.0m,-2.0m,-3.0m とした. 図8に結果を示す.



全てのケースについて、水理模型実験と同様に汀線から の距離 2m 地点が一番速くなりグラフ形状は近いものにな った. 汀線からの距離が 1m, 3m の地点ではケース 1 が水 理模型実験の値に最も近く、2m の地点ではケース 2 が最 も近い値になっている. また、水理模型実験では 1m 地点 が 1.6m/s 程度, 3m 地点が 1.5m/s 程度とやや 1m 地点の方 が速くなっているが、ケース 1 は同様に 1m 地点の方が速 く、ケース 2 では 1m 地点と 3m 地点で同程度の速さ結果 になった.

このように、全体的に見ると流速においてはケース1が 最も良好に再現されている.

(4)解析結果(勾配ありモデル)のまとめ

波高については、ケース3が比較的良好に再現され、作 用力についても同様にケース2とケース3が比較的良好に 再現された.流速においては、ケース1とケース2が比較 的良好に再現されている.

以上の結果から全体的にはケース2が最も良好に再現さ れたケースとなった.

4. 解析結果(勾配なしモデル)

勾配ありモデルの結果を踏まえ,勾配なしモデルではケ ース2とケース3において解析を行い,水理模型実験の結 果とVOF法による解析の結果を比較した.なお,勾配なし モデルにおいては,それぞれの地点で波高の比較は行わず, 遡上高を比較した.

(1)構造物に対する作用力の比較

図9に構造物に対する作用力の比較を示す.作用力については、最大値(衝撃波圧)と平均値(持続波圧)で勾配ありモデルと勾配なしモデルを比較した.なお、VOF法による解析結果ではその言及はされていないので両者に記載している.



(b) 平均値(持続波圧)図 9 構造物に対する作用力の比較

衝撃波圧については、水理模型実験では高さ0.01mから 0.11m 程度までは勾配ありモデルが勾配なしモデルの2倍 程度になっている.一方、ケース2においては、ケース3 より値が水理模型実験に近いものの、高さ0.01mから0.05m 程度までは勾配ありモデルは勾配なしモデルの2倍程度の 値だが、高さ0.11m付近は1.5倍程度になっている.ケー ス3においては、高さ0.01mで勾配ありモデルは勾配なし モデルの1.3倍程度、0.05mから0.11m付近では2倍程度 の値となった.

持続波圧については、水理模型実験では高さ0.01mでは 勾配ありモデルは勾配なしモデルの3倍程度、高さ0.05m 付近では4倍程度となり、高さ0.11m以上では勾配なしモ デルの持続波圧が0に近い状態になっている.一方、ケー ス2については勾配ありモデルの値が水理模型実験に近い ものの、全ての高さにおいて勾配ありモデルは勾配なしモ デルの2倍程度の値になった.ケース3については、勾配 なしモデルの値が水理模型実験に近いものの、勾配ありモ デルは勾配なしモデルの1.3倍程度の値となった.

(2)流速の比較

図 10 に流速の比較を示す. 勾配ありモデル同様に VOF 法による解析結果の記載はなかったので水理模型実験値と 比較する.



図 10 流速の比較

水理模型実験では, 汀線から 1m の地点では勾配ありモ デルは勾配なしモデルの 1.3 倍程度, 2m, 3m の地点では 1.5 倍程度の値となっている. 一方, ケース2とケース3に おいては, 1m, 3m 地点では勾配ありモデルは勾配なしモ デルの1.3 倍程度, 2m 地点では水理模型実験同様に1.5 倍 程度となった.

(3) 遡上高の比較

図 11 に遡上高の比較を示す.水理模型実験では,汀線から 1m, 2m, 3m の地点での値があり, VOF 法の結果には勾配ありモデルのみ 1.5m, 2.5m, 3.5m に記載されていたものをそのまま併記している.本研究においては,水理模型実験同様, 1m, 2m, 3m 地点での値とした.





遡上高は、いずれのケースにおいても 0m 地点では値が 大きく、1m、2m 地点では小さくなり、3m 地点では再度大 きくなるという傾向は再現された.

水理模型実験では、0m、1mの地点では勾配なしモデル と勾配ありモデルにほとんど差が無いが、2m、3m地点で は0.03m程度値が高く勾配ありモデルの方が1.3倍程度大 きくなっている.一方、ケース2では0m、1m、2m地点で はほとんど差が無いもののやや勾配なしモデルの方が遡上 高が大きくなり、3m地点では勾配ありモデルの方が0.06m 程度大きい値となり勾配なしモデルの1.3倍程度の値とな った.ケース3も同様に0m、1m、2m地点では勾配なりモデ ルが0.03m程度値が大きく勾配なしモデルの1.3倍程度と なった.

(4)解析結果(勾配なしモデル)のまとめ

構造物に対する作用力の比較においては、最大値(衝撃 波圧)では、高さ0.01~0.05mではケース2が勾配ありモ デルが勾配なしモデルの2倍になり、勾配ありモデルと勾 配なしモデルの倍率が近いものになった. 平均値(持続波 圧)では,ケース2の勾配ありモデルとケース3の勾配な しモデルがそれぞれ近い値となったが,勾配ありモデルと 勾配なしモデルの倍率については水理模型実験とは異なる 結果となった.

流速においては,値はケース2の勾配ありモデルとケース3の勾配なしモデルが値は近いものになり,勾配ありモデルと勾配なしモデルの倍率は3m地点では異なるものの1.3倍から1.5倍程度と水理模型実験と近い結果になった.

遡上高においては、1m 地点までは勾配なしモデルも勾配 ありモデルも比較的水理模型実験と一致する結果となり、 計測地点が汀線から離れるにつれ、水理模型実験との値の 差は大きくなったが、勾配ありモデルと勾配なしモデルの 倍率は近い結果になった.

5. まとめ

本研究は、先ず勾配ありモデルについて水理模型実験の 結果との値の比較を行った. 粒子径や時間刻みなどはケー スごとに変えずに、造波板の速度の違いによる結果を比較 したところ、波高についてはケース3が比較的良好に再現 され、構造物に対する作用力についてはケース2とケース 3が比較的良好に再現され、流速においては、ケース1と ケース2が比較的良好に再現された. 全体を通して考える とケース2が比較的良好に再現されたといえる.

次に、勾配なしモデルについて勾配ありモデルとの倍率の比較を行なった.構造物に対する作用力については、最大値(衝撃波圧)については、高さ0.01mから0.05mではケース2が勾配ありモデルが勾配なしモデルの2倍となり、高さ0.05mから0.11mではケース3が勾配ありモデルが勾配なしモデルの2倍程度となり水理模型実験の倍率と近いものになった.平均値(持続波圧)については,ケース2については勾配ありモデルが勾配なしモデルの2倍程度の倍率となり、水理模型実験の倍率とは一致しない結果となった.流速については、勾配ありモデルと勾配なしモデルの倍率は1.3倍から1.5倍程度と水理模型実験と近い結果になった.遡上高については、水理模型実験との差が大きいところでも勾配ありモデルは勾配なしモデルの1.3倍程度となり、倍率は近い結果になった.

以上のように、造波板の速度による波高、構造物に対す る作用力、流速の結果や勾配ありモデルと勾配なしモデル のそれぞれの結果に対する倍率で再現性の検討を行なった. 全体的に比較的再現性が高かったケース2は、水理模型実 験よりも波高は高く、流速は遅いという結果になった. 今後は、構造物に対する作用力の検討のために全ての比較に おいて共通して1つのケースの再現性が高くなるよう、詳 細な検討が必要である.

参考文献

- 国土交通省港湾局:防波堤の耐津波設計ガイドライン, 2013.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所:国総研資料第 742 号津波避難ビル等の構造上の要件の解説,2012.
- 3) 富田孝史,有川太郎,安田誠宏,今村文彦,河田恵 昭:インド洋大津波のスリランカ南西部における津波 実態・被害調査報告,海岸工学論文集,Vol.52,pp.1406-1410,2005.
- 有川太郎、山田文則、秋山実:3次元数値波動水槽に おける津波波力に関する適用性の検討、海岸工学論文 集, Vol. 52, pp. 46-50, 2005.