陸上構造物前面に作用する津波波圧に関する数値実験

Numerical Study for the Hydrodynamic Pressure on the Front of Onshore Structures by Tsunami

高島大輔¹・木原直人²・田中伸和³

Daisuke TAKABATAKE, Naoto KIHARA and Nobukazu TANAKA

We have carried out three-dimensional numerical simulations of a tsunami passing through a structure to investigate the characteristics of the hydrodynamic force induced by a tsunami. In the simulation, an idealized tsunami was used, which has a sharp head and a constant flow velocity and a constant flow depth in the upstream region. The results show the water level on the front face of the structure can be estimated by using the specific energy of the upstream region of the structure. In addition, the hydrodynamic force acting on the front face of the structure is approximated as the hydrostatic force with the water level of the front face of the structure. Thus, this algorithm enables us to estimate the hydrodynamic force acting on the front face of the structure by using the specific energy predicted by tsunami inundation simulations.

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震で発生した津波により多数の建屋が破損・流出したことが報告されている。被害を引き起こした主要な外力の一つとして、津波通過時における水圧による水平荷重である津波流体力が挙げられる。

陸上構造物に作用する津波流体力の評価に関しては、1960年のチリ津波以降、実験的・数値的に多くの検討がなされ複数の津波流体力の推定式が提案されている。例えば、構造物全体に作用する流体力の推定式として、飯塚ら（2000）は抗力係数を用いた推定式を提案している。一方、構造物前面に作用する流体力の推定式として、朝倉ら（2000）は、浸水深から構造物前面の波圧分布を推定する式を提案している。朝倉ら（2000）と同様に、構造物前面の波圧分布を推定する提案式の中には、波圧分布がフルード数に依存するものや（Asakuraら（2002）；榊山（2012））、浸水深から求まる静水圧と流速から求まる動圧成分とで構成されるものがある（有光ら（2012a, b））。最近、木原ら（2012）は陸上氾濫する津波の3次元数値流体解析を実施し、津波が越流しない条件における有限幅構造物のみを対象として、構造物前面での波圧分布が構造物上流側の比エエネルギーに依存することを明らかにした。

本報では木原ら（2012）の提案式の適用範囲の拡張を目的に、無限幅構造物に対する3次元数値流体解析を実施し、その適用性について検討する。

2. 数値計算の概要

本研究では水面をVOF法（Hirtら（1981））によって

追跡する3次元数値流体解析コードを用いて、非越流条件下で無限幅構造物に衝突する津波を対象とした数値計算を実施した。以下に、計算条件、初期条件・境界条件及び実施した計算ケースについて示す。

(1) 計算条件

図-1に解析モデルの概念図と座標軸を示す。同図には上に平面図、下に $y=0$ における断面図を示す。計算領域は流入境界を有する矩形の水路で、水路底面は水平であり、津波が越流しない十分な高さを持つ剛体の直方体構造物を設置した。座標軸は同図に示すように水路底面の構造物前面中心を原点とし、流れ方向を x 軸（上流側を負と定義）、横断方向を y 軸、高さ方向を z 軸と定義した。水路、構造物の寸法及び境界の位置を図-1に示す。これらの寸法は、構造物幅 W を基準としており、反射波が解析時間内に流入境界に達しないように十分長く水路長さを設定した。尚、本報では無限幅（ y 軸方向）構造物前面に生じる流体力を対象とするため、計算領域の幅を構造物幅 W として周期境界条件を仮定した。計算における格子間隔は、構造物周りでの津波の挙動を高精度に再現するために不等間隔とし、構造物前面近傍において x 方向及び y 方向の格子間隔を細かく（ $\Delta x = \Delta y = 0.05W$ ）設定し、構造物前面から遠ざかるにつれて、等比数級的

図-1 解析モデルの概念図

1 正会員	修(工)	(一財)電力中央研究所	地球工学研究所
2 正会員	博(理)	(一財)電力中央研究所	地球工学研究所
3 非会員	工博	(一財)電力中央研究所	

(x 方向の公比1.1, y 方向の公比1.05)に格子間隔を広げた。 z 方向については流入水深 h_{in} に応じて格子間隔を変えており($\Delta z = h_{in}/10$), x 方向及び y 方向と同様に, 底面から基準高さまでを一定間隔とし(Δz), z が大きくなるにつれて等比数級的(公比1.05)に格子間隔を広げた。尚, 基準高さは後述する準定常浸水深以下になるように定めた。

(2) 初期条件・境界条件

a) 初期条件

図-1に示すように, 計算領域内の $x < -0.5W$ に一定水深の津波を模擬した段波を以下の条件で計算初期に与えた。

- ① 津波先端は構造物前面と平行とした。
- ② 津波先端は構造物前面から上流方向へ $0.5W$ の位置とした。
- ③ 津波の浸水深は $x < -0.5W$ において流入水深 h_{in} で一定とした。
- ④ 津波の流速は全ての計算格子内で一様に与えた。 y 方向及び z 方向の流速は0とし, x 方向の流速は後述する境界からの流入流速 u_{in} とした。

b) 境界条件

水路底面, 上面及び側面において自由滑り境界条件を適用した。最上流側に流入境界を適用し, 境界において流速及び水深を初期条件と同様の一定値(u_{in} , h_{in})のディリクレ境界条件を, 圧力にはノイマン条件を適用した。

(3) 計算ケース

Asakuraら(2002)によると津波流体力は流入津波のフルード数に依存することが知られている。そのため, 流入津波のフルード数 $Fr = (u_{in} / (gh_{in})^{1/2})$ を0.8, 1.5, 2.0, 3.0の4つを対象に数値計算を実施した。

3. 準定常流体力による津波流体力評価の妥当性検証

(1) 無次元量の定義

以下の議論では構造物幅 W , 流入水深 h_{in} , 水の密度 ρ 及び重力加速度 g により, 位置 x , 時間 t , 流速 u , 水深 h , 圧力 p , 流体力 F を以下のように無次元化して用いる。

$$\begin{aligned} x' &= x/h_{in} \\ t' &= \sqrt{g/h_{in}} t \\ u' &= u/\sqrt{g/h_{in}} \\ h' &= h/h_{in} \\ p' &= p/\rho gh_{in} \\ F' &= F/\rho gh_{in}^2 W \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, 「 $'$ 」は無次元量を示す

(2) 構造物前面における応答の基本的特性

a) 時系列変化

図-2に構造物前面における無次元浸水深及び無次元流

図-2 構造物前面における浸水深及び流体力の時系列分布

体力の時系列分布(無次元時間)を示す。ここで流体力は, 構造物前面に生じる津波波圧の積分値である。

同図より流入津波のフルード数に係らず, 津波の衝突後に浸水深が上昇する。その後, 浸水深が低下しある浸水深を中心に変動する準定常状態に達する。本報では, 津波衝突後に極大となる浸水深を「極大浸水深」, 準定常状態における浸水深を「準定常浸水深」と称する。極大浸水深及び準定常浸水深は, フルード数の増加につれて増加し, フルード数の大きなケースほど準定常状態における浸水深の変動が大きい。

流体力についても浸水深と同様に, 流入津波のフルード数に係らず時系列分布の傾向は同様であり, 津波衝突後に瞬間的なピークが発生し, その後, 緩やかに流体力が増加して極大となり, ある大きさの流体力を中心に変動する準定常状態に達する。浸水深と同様に, フルード数が高いほど流体力は大きくなり, 準定常状態の変動も大きくなる。福井ら(1962)によると, 作用時間の短い瞬間的なピークは, 衝撃段波波圧に対する流体力であると考えられ, その後に続く流体力は重複波波圧に対する流体力と考えられる。本報では衝突後の瞬間的なピークを「衝撃流体力」, 次に発生する流体力の極大値を「極大流体力」, 準定常状態の流体力を「準定常流体力」と称する。

b) 流体力の特徴

図-3(a)に衝撃流体力発生時における構造物前面の無次元圧力の鉛直分布を示す。ここで, 圧力は構造物前面での横断方向($-W/2 \leq y \leq W/2$)に積分平均したものである。また, 同時刻における構造物前面の浸水深に対す

図-3 構造物前面における圧力の鉛直分布

る静水圧分布についても示す。衝撃流体力発生時の圧力は、後述する他の流体力発生時に比べて顕著に大きくなるが低位置に分布することがわかる。

図-3(b)に極大浸水深発生時における構造物前面の無次元圧力の鉛直分布を示す。同図より $z' < 2$ においては直線的に分布しているが、それよりも上部では曲線的に分布しており圧力が小さい。極大浸水深は、津波衝突後に水塊が巻き上げられた状態を表しており、巻き上げられた水塊による構造物への作用は小さいことを示している。

図-3(c)に極大流体力発生時における構造物前面の無次元圧力の鉛直分布を示す。同図より、概ね直線的に分布するが、上部で極大値を有するような分布となること、同時刻の浸水深に対する静水圧分布よりも小さな値となることがわかる。極大浸水深発生時の状態から準定常状態へ遷移する過程において、津波衝突後に巻き上げられた水塊が落下し、その一部が構造物に作用することにより、極大流体力が発生する(木原ら(2012))。すなわち、極大流体力も衝突後に生じる現象であると言える。

図-3(d)に準定常流体力発生時における構造物前面の無次元圧力の鉛直分布を示す。同図より構造物前面の圧力は直線的に分布しており、同時刻の浸水深に対する静水圧分布とほぼ一致することがわかる。

(3) 本解析結果の解釈とその検証

前節で示した構造物前面での浸水深や流体力の時間的変化は、その特徴から津波衝突時と準定常時の二つの期間に大別される。前者は、衝撃流体力発生時、極大浸水

図-4 フルード数と流体力の比較

深発生時及び極大流体力発生時を指し、後者は準定常浸水深・流体力発生時を指す。一方、実際の津波は、水深及び流速が時々刻々と変化する非定常な現象であり準定常状態は存在しない。しかしながら、本解析での津波衝突後から準定常状態に至るまでの無次元時間は15程度であり、浸水深が5mの巨大な流入津波の場合でも約10(=15/(g/5)^{1/2})秒となり、実際の津波の水深や流速の変化する時間スケールに比べて非常に短い。また、津波衝突時における構造物前面の浸水深は、後続する津波の浸水深に比べて小さいことが予測さ、津波衝突時に推定される極大流体力は、後続の浸水深の大きな状態における準定常流体力に比べて小さいと推測される。解析での津波衝突時に見られる現象は実際の津波の流れの変化に比べて十分に短いため、流れの急変時を除いては、本解析での津波衝突時の現象を無視でき、実際の津波の時々刻々と変化する流れの条件下における本解析で定義した準定常流体力が、構造物前面に作用すると推定できる(木原ら(2012))。この推定の妥当性を確認するため、長周期の津波が陸上構造物に及ぼす波圧を大型実験及び数値計算により調べた榊山(2012)の結果と比較する。

榊山(2012)の実験では、造波板により津波を発生させ、護岸背後の陸上に設置した無限幅構造物及び有限幅構造物に作用する波圧特性を調べている。護岸前面での津波の最大水位は約0.08mであり、周期は約17秒である。最大水位が6.5mの津波の場合には、フルード則変換で、周期は153秒となり、実際の津波に比べて周期が短いものの、既往の津波実験の中では最も長周期の津波を用いた実験の1つである。榊山(2012)の数値計算では、上述の大型実験の条件を基にして複数の津波の周期や水位の条件での数値実験を実施している。さらに、榊山(2012)は、発生させる津波の条件は上記と同様であるが、構造物を設置しない条件での実験及び数値計算も併せて実施している。ただし、実験及び数値計算ではフルード数が1.8程度以下を対象としている。

図-4にフルード数と無次元化された流体力の関係について示す。同図には木原ら (2012), 榊山 (2012) の結果と朝倉ら (2000) の推定式も併せて示し, 凡例中の W/h_m は構造物幅と流入津波の水深比を示す。同図において, 榊山 (2012) の実験及び数値計算結果では, 流体力の最大値と構造物を設置していない条件でのフルード数との関係を示している。構造物を設置していない条件での結果は, 反射波等の構造物の影響がない条件での結果であり, 本研究の検討においては流入部での値がそれに該当する。そのため, 本研究結果では流入部でのフルード数と準定常流体力の関係を図示する。なお, 有限幅構造物に対する木原ら (2012) の結果も示す。

榊山 (2012) では, 流体力とフルード数の関係は, 概ね, 無限幅構造物に対しては実線, 有限幅構造物に対しては破線で近似できる。本研究結果では, 無限幅構造物及び有限幅構造物に係らず, 実験及び数値計算で用いられたフルード数の範囲で榊山 (2012) における結果と調和的であることがわかる。さらに, 榊山 (2012) は最大波圧時に構造物前面の圧力分布が概ね静水圧分布となることを示しており, 本研究においても, 図-3 (d) に示すように準定常流体力時に圧力分布は静水圧分布になることを確認している。このことは, 流体力が最大となる流れの条件下における本研究で見られた準定常流体力を用いることにより, 津波による最大流体力が推定可能なことを示している。従って以下では, 準定常流体力に着目して議論する。

4. 流体力評価式の提案

有限幅構造物を対象に比エネルギーを用いた津波流体力評価法を提案している木原ら (2012) の提案式について, 無限幅構造物に対する適用性を検討する。

(1) 比エネルギーと構造物前面浸水深の関係

構造物から無次元距離 x' だけ上流側における比エネルギー H を次式で定義する。

$$H = \frac{\int_{-W/2}^{W/2} h dy}{W} + \frac{1}{2g} \left[\frac{\int_{-W/2}^{W/2} \int_{z_{bot}}^{z_{top}} u dz dy}{W(z_{top} - z_{bot})} \right]^2 = \bar{h} + \frac{u^2}{2g} \quad \dots (2)$$

ここで z_{top} 及び z_{bot} はそれぞれ (x, y) における上部境界, 下部境界, u は (x, y) における x 方向流速である。右辺第1項は位置水頭, 右辺第2項は速度水頭を表し, それぞれ構造物幅方向の積分値を平均している。また, 構造物前面と構造物上流側のある位置における比エネルギーが保存されると仮定すると, 次式のように書ける。

$$\bar{h}_f = \bar{h}_{up} + \frac{1}{2g} u_{up}^2 = H_{up} \quad \dots (3)$$

ここにサフィックス f は構造物前面における値, サフィ

図-5 上流側の比エネルギーと構造物前面浸水深の比較

図-6 構造物前面浸水深と流体力の関係

ックス up は上流側における値を示す。式 (3) では構造物前面の x 方向流速が 0 であることを用いており, 構造物前面浸水深は上流側における流速と浸水深によって推定できることを示している。木原ら (2012) は, 有限幅構造物の場合, 構造物近傍においては構造物の影響による比エネルギーの変動が大きいため, 比エネルギーの算出位置を流入津波の水深の 5 倍 ($x' = -5$) 程度としている。

図-5 に準定常状態における上流側 ($x' = -5$) の無次元比エネルギーと構造物前面における無次元浸水深の関係を示す。ここでは, 木原ら (2012) の有限幅構造物に対する結果も示す。同図より, 無限幅構造物においても $x' = -5$ における比エネルギーと浸水深が概ね一致することが確認できる。これは加藤ら (2012) の結果と調和的である。

(2) 構造物前面浸水深と準定常流体力の関係

図-3 に示したように準定常流体力発生時には, 構造物前面に作用する圧力の鉛直分布は, 同時刻における構造物前面浸水深に対する静水圧分布で近似できる。図-6 に準定常状態における構造物前面浸水深と準定常流体力の関係を示す。ここでは, 木原ら (2012) の有限幅構造物に対する結果も併せて示し, 構造物前面浸水深に対する静水圧近似による流体力を破線で示す。構造物前面浸水深の大きい, すなわち流入津波のフルード数の大きなケースでは, 静水圧近似により推定される流体力は過大と

なるが、構造物幅が大きくなるにつれて静水压近似により推定される流体力との乖離が小さくなり、無限幅構造物では概ね一致することが確認できる。

(3) 比エネルギーを用いた流体力評価

以上から、非越流条件下における無限幅構造物及び有限幅構造物に生じる準定常流体力と構造物前面の波圧分布は、対象構造物の上流側の浸水深及び流速を用いることにより、次式に基づいて評価できる。

$$F = \frac{1}{2} \rho g H_{up}^2 W \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$p_f(z) = \rho g (H_{up} - z) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに p_f は構造物前面に作用する圧力である。ただし、津波到達直後には、準定常流体力よりも大きな衝撃流体力や極大流体力の生じる可能性に留意する必要がある。

(4) 既往の流体力評価式との比較

まず、朝倉ら (2000) の流体力推定式と比較する。朝倉ら (2000) では、構造物を設置していない条件での浸水深と構造物前面での流体力の関係を示しており、ソリトン分裂しない条件では、構造物前面での波圧分布が浸水深の3倍の深さの静水压分布より小さくなると述べている。本研究における解析結果と朝倉ら (2000) の推定式による結果を比較すると、本研究結果は有限幅構造物の場合には構造物を設置していない条件でのフルード数 $Fr < 2$ で小さく、 $Fr > 2$ で大きい。無限幅構造物の場合には $Fr < 1.5$ で小さく、 $Fr > 1.5$ で大きい (図-4参照)。

次に、有光ら (2012b) の流体力推定式と比較する。有光ら (2012b) は構造物が存在する条件で実施した数値計算に基づき次式で示す流体力推定式を提案している。

$$p_f(z) = \rho g (h_A - z) + \rho u_A^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに h_A 及び u_A はそれぞれ構造物から2格子以上流側の点での浸水深及び水平流速である。式 (6) での圧力分布は台形型であり、静水压分布となる本研究での準定常状態における圧力分布 (図-3 (d)) とは分布型が異なる。ただし、図-3 (a) 及び (b) に示す衝撃流体力発生時や極大浸水深発生時における圧力分布は台形型に分布型する。式 (6) から推定される構造物前面での流体力と式 (4) とを比較するため、式 (6) を積分して単位幅当たりの流体力を求め、さらに定義点が異なるが h_A 及び u_A を h_{up} 及び u_{up} で与え、 h_{up} 及び u_{up} から求まるフルード数 Fr_{up} で表すと次式となる。

$$F_A = \frac{1}{2} \rho g h_{up}^2 \left(1 + 2 Fr_{up}^2 \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

同様に式 (6) も Fr_{up} で表すと次式となる。

$$F = \frac{1}{2} \rho g h_{up}^2 \left(1 + Fr_{up}^2 + \frac{1}{4} Fr_{up}^4 \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式 (7) 及び式 (8) より $Fr_{up} < 2$ で、式 (6) から推定される流体力と比して、式 (4) から推定される流体力は小さく、 $Fr_{up} > 2$ で式 (4) から推定される流体力は大きい。

5. まとめ

本研究では、津波を模擬した段波上の流れの3次元数値計算により、津波の陸上氾濫時における陸上構造物の前面に作用する津波流体力について検討した。その結果、有限幅および無限幅の両方の構造物に対して、構造物から浸水深の5倍程度離れた上流での比エネルギーもしくは構造物前面での浸水深を用いることにより、構造物前面に作用する流体力を評価できることを明らかにした。

ただし、本研究で実施したような3次元非静水压数値計算では上流での比エネルギーおよび構造物前面での浸水深の両方を精度良く再現できるが、静水压近似を仮定した数値解析手法、例えば水深積分した平面2次元解析を用いた場合には、構造物前面を含む近傍での浸水深及び流速の再現精度は高くない。したがって、静水压近似を仮定した数値解析手法から得られる計算結果を利用して構造物前面での流体力を推定する場合には、上流での比エネルギーを用いることが望ましい。

参 考 文 献

- 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, Vol.47, pp. 911 - 915.
- 有光 剛・大江一也・川崎浩司 (2012a) : 構造物前面の浸水深と流速を用いた津波波圧の評価手法に関する水理実験, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp. 776-780.
- 有光 剛・大江一也・川崎浩司 (2012b) : 平面2次元津波遡上計算結果を用いた津波波圧算定方法の提案, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp. 781 - 785.
- 飯塚秀則・松富英夫 (2000) : 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, Vol.47, pp. 381 - 385.
- 加藤史訓・諏訪義雄・藤田光一・岸田弘之・五十嵐崇博・岡村次郎・林雄一郎 (2012) : 建築物等による津波のせき上げ評価方法, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp. 331 - 335.
- 木原直人・高畠大輔・吉井 匠・池野正明・太田一行・田中伸和 (2012) : 陸上構造物に対する津波流体力評価 (その1) —有限幅構造物に対する非越流条件下での数値的検討—, 電力中央研究所 研究報告, N12010.
- 榊山 勉 (2012) : 陸上遡上津波の伝搬と構造物に作用する津波波圧に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp. 771 - 775.
- 福井芳郎・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄 (1962) : 津波の研究 (Ⅱ) 段波津波の堤防におよぼす影響, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 50 - 54.
- Asakura, R., K. Iwase, T. Ikeya, M. Takao, T. Kaneto, N. Fujii and M. Ohmori (2002) : The tsunami wave force acting on land structures, Proc. 28th ICCE, pp. 1191-1202.
- Hirt, C.W. and B.D. Nichols (1981) : Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., Vol.39, pp. 201-225.