偏心構造を有する浮体式津波避難施設の高精度運動予測手法の開発

Development of a High Accuracy Numerical Model for Predicting Motion of A Floating-Type Evacuation Shelter from Tsunami with Eccentricity

松本弘史¹・重松孝昌²

Hiroshi MATSUMOTO and Takaaki SHIGEMATSU

A floating-type evacuation shelter from tsunami is the facility which is swepted in tsunami. Therefore, for establishment of the shelter on site, it is an important task to predict motion of the shelter with accuracy in terms of strength for tsunami fluid force and safety of evacuees. In this study, a numerical model for prediction of translational and rotational motion of the shelter is presented. According to comparison with laboratory experimental results, calculated results on translational and rotational motion reasonably agree with experimental ones with accuracy.

1. 序論

(1) 研究の背景

津波襲来時には、高齢・障害などの身体的要因や正常化の偏見(片田ら, 2005)などの心理的要因、さらには、水門閉鎖や避難誘導・喚起を行うなどの職業的要因が複雑に絡み合うために、迅速な避難が困難な場合が起こりうる。それ故、地域全体で、住民の迅速な避難を促す仕組みを考案するとともに、逃げ遅れた人々を救助する仕組みを考えておかなければならない。たとえ、地震動が収まった直後に避難行動が取れた場合であっても、避難した場所が被災して津波の犠牲となってしまう場合も予想される。東日本大震災では、津波災害に備えて市町村等が指定した避難所の多くが被災し、地域によっては避難者の多くが津波の犠牲となった。そのため、今後、襲ってくるかもしれない巨大津波から1人でも多くの人々を救うためにも、減災の視点にたち、様々な対策や技術を考えなければならない(四国運輸局, 2013)。

(2) 浮体式津波避難施設の課題

本研究は浮体式津波避難施設の提案・開発するものであり、これを避難所等における更なる避難空間、あるいは、逃げ遅れた人々に対する避難空間として利用していただくことによって、減災に寄与することを目的としている。避難施設は流体力を受けて浮上・移動する可動構造物であり、流体力作用時の回転運動を抑制して安定性を向上させるために偏心構造を想定している。それ故、津波作用時の強度や避難者の安全性の観点から、作用流体力の大きさや流体力作用直後の挙動を高精度に予測することは重要な課題である。

図-1 波作用直後の様子

松本ら(2014a)は、津波流体力に対する避難施設の強度を検討するために、作用する津波流体力を抗力と慣性力の和としてモデル化して、球形ブイの漂流速度を求めるために使用した抗力係数(谷澤ら, 2001)を用いれば、波作用直後の流体力を抗力のみによって概ね推定できることを示している。一方、松本ら(2014b)は、偏心構造を有する避難施設の並進運動および回転運動の特性を実験によって明らかにしており、さらに、避難施設の運動予測手法を構築して、その妥当性を調べている。同手法では、避難施設の詳細な運動を予測できなかったが、その理由として、避難施設の偏心構造や水深の非対称性、避難施設の上流側で波が堰上がる現象(図-1)を考慮してなかったためであると考察している。すなわち、偏心構造を有する避難施設の動態を高精度で予測する手法は確立できておらず、避難者の安全性を検討するうえで課題を残していた。

(3) 研究の目的

以上の状況に鑑み、本研究では、偏心構造を有する浮体式津波避難施設の運動を高精度に予測できる手法を開発することを目的とする。

1 学生会員 修(工) 大阪市立大学大学院工学研究科
2 正会員 博(工) 大阪市立大学教授大学院工学研究科

図-2 均質構造モデル

図-3 偏心構造モデル

2. 浮体式津波避難施設挙動モデルの構築

本研究で開発した浮体式津波避難施設の運動予測モデルは、「津波伝播遡上モデル」と「浮体式津波避難施設挙動モデル」で構成される1wayモデルである。すなわち、「津波伝播遡上モデル」で計算される水位・流速情報を用いて、避難施設の挙動計算を行う。津波の伝播遡上計算は後藤ら（1982）の方法を用い、遡上計算のアルゴリズムは小谷ら（1998）を参考とした。モデルの詳細については松本ら（2014b）を参照されたい。

(1) 均質構造モデル

従来の避難施設挙動予測手法（松本ら，2014b）は、避難施設が均質な密度分布を有する球形の剛体と仮定しており、避難施設の偏心構造は考慮していなかった（図-2(a)）。すなわち、避難施設の挙動は、作用する流体力 F_f （抗力，慣性力）や浮力 B ，避難施設の底面摩擦力 F_b や自重 W を考慮して、その中心 C についての並進および回転に対する運動方程式を解くことによって予測していた。このとき、 F_f を求めるために、中心 C における水深 D_f および流速 u_f を用いるが、これらは、津波伝播遡上モデルで計算された水位および流速の情報を、それぞれ2次関数補間および線形補間して求めている。このような手法の妥当性を検証するために、松本ら（2014b）は図-4に示す計算領域で、汀線（ $X_s=0$ ）に設置した避難施設（半径 $r=0.06\text{m}$ ）に孤立波（波高 H_0 ）を作用させて挙動計

図-4 計算領域

算を行い、避難施設の運動に関する実験結果と比較した。なお、実験で用いた避難施設は偏心構造を有していることに注意されたい。詳細は松本ら（2014b）を参照されたい。

図-2(b)，(c)に、このようなモデルで推定される並進速度 u_s および回転角速度 ω の経時変化を示した。 u_s および ω は、ともにそのオーダーは概ね実験結果と合致するものの、一様な増加傾向を示して実験で計測されるような時間変動特性を再現することができなかった。

(2) 偏心構造モデル

次に、避難施設が球殻と内部床で構成され、偏心構造を有することを考慮した（図-3(a)）。すなわち、避難施設の挙動は、重心 G に対する運動方程式および重心 G 回りの回転に対する運動方程式を解くことによって予測した。

図-5 水深の非対称性を考慮した偏心構造モデル

図-6 波の堰上げ量を考慮した偏心構造モデル

$$m \frac{du_g}{dt} = F_f - F_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = F_b(r - r_g \cos \theta) - F_f(r - r_f - r_g \cos \theta) - (W - B)r_g \sin \theta - B r_g \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 m ：避難施設の質量（ $=W/g$ ）、 g ：重力加速度、 u_g ：重心Gの変位速度、 I ：重心Gに対する慣性モーメント、 r_g ：偏心距離（中心Cから重心Gまでの距離）、 θ ：回転角度、 r_f ：避難施設の底面から流体力 F_f の作用点を通る水平軸までの鉛直距離である。流体力 F_f および底面摩擦力 F_b の算出式は松本ら（2014b）を参照されたい。斜面上にある避難施設の並進速度 u_s は、 F_f と最大静止摩擦力 F_0 の大小関係に基づいて決定した。すなわち、 $F_f < F_0$ の場合は、回転運動による中心Cの変位速度 $u_r (= r\omega)$ を u_s として、 $F_f \geq F_0$ の場合は、 u_g を用いて求められる中心Cの変位速度 $u_c (= u_g + r_g \omega \sin \theta)$ と u_r のうち、大きい方を u_s とした。

$$u_s = \begin{cases} u_r & (|F_f| < F_0) \\ \max(u_c, u_r) & (|F_f| \geq F_0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\max(a, b)$ はaとbのうち最大値をとることを意味する。このような予測手法で得られた計算結果と実験結果の比較を、図-3(b)、(c)に示す。 u_s および ω はともに過小に推定されているものの、偏心構造を考慮する

ことによって両者の時間変動特性は再現できるようになっていることがわかる。ビデオ撮影画像による観察に依れば、両者の大きさが過小に推定された原因として、図-1に示すような避難施設の上流側と下流側で生じる水位の相違に基づく流体力の影響が考慮されていないためであると考えられた。

(3) 偏心構造モデル（水深の非対称性を考慮）

そこで、このような水深の非対称性を考慮するために、津波伝播週上モデルで計算された水位情報を二次関数で近似して、避難施設の没水部の上流端水深 D_{f1} 、および、下流端水深 D_{f2} を算出し（図-5(a)参照）、これらを用いて浮力 B を求めることによって、浮力のアンバランスを考慮した。なお、式(2)は、右辺第4項に避難施設の中心Cから浮心C'までの水平距離 r_c が追記された式(4)に書き換えられる。

$$I \frac{d\omega}{dt} = F_b(r - r_g \cos \theta) - F_f(r - r_f - r_g \cos \theta) - (W - B)r_g \sin \theta + B(r_c - r_g \sin \theta) \quad \dots\dots\dots (4)$$

図-5(b)、(c)に示す計算結果と実験結果の比較によれば、本手法による u_s および ω の大きさや両者の時間的変動特性は、偏心モデルによるそれらよりも良好に計算できるようになっていることが確認できる。この結果より、浮力のアンバランスは避難施設の運動を予測するうえで重要な要因であることがわかる。しかし、波作用直後の両

者の増加率は、依然として過小に推定されたままであることもわかる。図-1を注意深く見ると、波が避難施設に作用した直後には水が大きく堰上っており、本手法にはこの堰上げによる流体力の影響が十分に考慮されていないと考えられた。

(4) 偏心構造モデル (波の堰上げ量を考慮)

構造物に作用する津波流体力を評価する方法には、構造物が存在しない場合の遡上水深で流体力を評価する方法(朝倉ら, 2000)や、構造物から代表的な流入津波水深の5倍以上離れた地点における比エネルギーで流体力を評価する方法(木原ら, 2012)などがある。本研究では、既に、抗力を用いて流体力の一部を評価している。したがって、後流域に形成される渦流の影響を考慮している抗力が、更なる水位差を生み出すと考えられるが、上述のモデルではこの水位差に基づく浮力成分が考慮されていない。そこで、避難施設に作用する抗力に相当する水位差を上流側の堰上げ量 Δh として推定し、 D_{f1} が図-5(a)で示される D_{f2} より更に Δh だけ大きくなるものとして、浮力 B を求めた(図-6(a))。

このような手法によって求めた u_s および ω の計算結果を、図-6(b), (c)に示す。これらの図によれば、波作用直後の u_s および ω の増加率がより精度良く計算できるようになっただけでなく、両者の最大値や時間変化も、より実験値との整合性がとれるようになっていることがわかる。

3. 避難施設の高精度運動予測

ここでは図-4に示す計算領域で、前節で構築した浮体式津波避難施設の運動予測手法(図-6)を用いて、作用波の波高 H_0 や避難施設の喫水 H_d が異なった場合に対して避難施設の挙動計算を行い、本手法の妥当性について検証する。なお、作用波および避難施設の諸元や、津波伝播遡上モデルによる作用波の再現性は松本ら(2014b)を参照されたい。

(1) 並進運動

図-7, 図-8はそれぞれ汀線($X_s=0$)に設置した喫水 $H_d=0.058\text{m}$ の避難施設が、流体力を受けて運動したときの並進速度 u_s および並進加速度 α_s の計算結果を、実験結果と比較して示したものである。両図より、いずれの H_0 においても、 u_s が波作用直後に急激に速くなり、その後、再び速くなって最大値に至るような時間的変動特性や、 α_s が波作用直後に急激に大きくなって最大となっており、その後、時間的変動特性を示すことが計算できており、さらに、 H_0 が大きいほど、両者の最大値が大きくなる傾向も再現できていることが確認できる。その一方で、極大値が出現するに至る過程においては、計算結果と実験結果の間に一定の位相差があるようにも見える。波作用直後

図-7 並進速度 u_s の比較($X_s=0$)

図-8 並進加速度 α_s の比較($X_s=0$)

図-9 最大並進加速度 $\alpha_{s,max}$ の比較($X_s=0$)

に u_s が急激に速くなった後に着目すれば、いずれの条件においても、計算結果は実験結果よりも大きな減少傾向を示しており、このことが、極大値の出現時刻やその予測精度に影響を及ぼしていると推察される。

図-9は、最大並進加速度 $\alpha_{s,max}$ と喫水 H_d の関係($X_s=0$)を示したものである。同図に依れば、 H_d/H_0 が大きくなるとともに $\alpha_{s,max}$ が減少するという実験によって見られる傾向が、計算によっても再現されていることが確認できる。

(2) 回転運動

図-10, 図-11はそれぞれ汀線($X_s=0$)に設置した喫水

$H_d = 0.058\text{m}$ の避難施設が、流体力を受けて運動し始めたときの回転角度 θ および回転角速度 ω の経時変化を実験結果と計算結果で比較したものである。これらの図より、いずれの H_0 においても両者の計算結果はともに、実験結果と比較して位相が僅かに速いものの、正弦的な時間変動特性を再現できており、また、 H_0 が大きいほど短時間で最大値をとり、また、最大値そのものも大きくなる傾向を再現できていることが確認できる。

図-12、図-13はそれぞれ最大回転角度 θ_{max} および最大回転角速度 ω_{max} と喫水 H_d の関係($X_s=0$)を実験結果と計算結果で比較したものである。これらの図によれば、両者の計算結果は、実験結果と比較して程度の差はあるものの、 H_d が小さくなるほど大きくなる傾向や、 H_0 が高くなるほど大きくなる傾向を再現できていることが確認できる。

4. 結論

本研究では、偏心構造を有する浮体式津波避難施設の運動予測手法の開発を試みた。本予測手法は、避難施設の偏心構造および水深の非対称性(浮力のアンバランス)、避難施設の上流側で波が堰上がることによって浸水深が急激に上昇する現象を考慮している点と、堰上がりによる浸水深の増加量を抗力による圧力差から推定している点に特徴を有している。このような予測手法を用いることによって、避難施設の詳細な運動を予測できることが確認された。

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.
- 片田敏孝・児玉 真・桑沢敬行・越村俊一(2005):住民の避難行動に見る津波防災の現状と課題-2003年宮城県沖の地震・気仙沼市民意識調査から-, 土木学会論文集, No.789, pp.93-104.
- 木原直人・高島大輔・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での数値的検討-, 電力中央研究所報告 N12010, 28p.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998):GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.356-360.
- 後藤智明・小川由信(1982):Leap-frog法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科資料, 52p.
- 四国運輸局(2013):津波救命艇ガイドライン, 22p.
- 谷澤克治・南真紀子・井本康司(2001):球形ブイの波による漂流速度について, 独立行政法人海上技術安全研究所発表会講演集(1), pp.27-32.
- 松本弘史・重松孝昌(2014a):浮体式津波避難シェルターに作用する津波流体力の推定に関する研究, 土木学会全国大会年次学術講演会, Vol.31, (投稿中).
- 松本弘史・重松孝昌(2014b):浮体式津波避難施設の運動予測に関する研究, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.70, No.2, (印刷中).

図-10 回転角度 θ の比較($X_s = 0$)

図-11 回転角速度 ω の比較($X_s = 0$)

図-12 最大回転角度 θ_{max} の比較($X_s = 0$)

図-13 最大回転角速度 ω_{max} の比較($X_s = 0$)