

弾性浮体と潜堤を併用した津波高さの低減

柿沼 太郎*

1. 序論

超大型浮体構造物の利用方法として、海上空港^①、風力・太陽光発電の基地や、物流ターミナル、そして、災害時の避難場所等が考えられる。また、弾性浮体によって、水の波のエネルギーを再生可能エネルギーに変換する研究も行なわれている^②。超大型浮体構造物は、水上で変形する。従って、その設計では、構造物の弾性変形と流体の運動の相互干渉を考慮する必要がある^③。こうした弾性浮体の挙動は、広い氷板が水上に浮かんでいる場合にも観測される^④。

薄板状浮体に孤立波が入射する場合を対象として、劉・堺^⑤は、弾性浮体の応答を調べた。そして、入射波の非線形性が比較的強い場合に、孤立波に先行する分裂波が生じることを見出した。ところで、こうした波の分裂により、入射波の波高が低減する。従って、弾性浮体は、入射した波の波高を低減させる効果を有すると考えられる。この点に着目し、著者ら^⑥は、弾性浮体と流体の相互干渉問題を対象とした数値モデルを適用し、超大型浮体構造物が有する津波高さの低減効果を検討した。そして、この現象に、次のような特性のあることが得られた。

(1) 相対波高の比較的大きな津波が弾性浮体に入射すると、分裂して、周期の短い浮体波が発生する。分裂して生じた分裂波は、位相速度が大きいため、津波高さが最大の主波に先行する。そして、分裂波が生じるにつれて、主波の津波高さが低減する。

(2) 浮体を通過した主波と分裂波は、浮

体のない水域で水面波となる。水面波の場合、主波の方が分裂波より位相速度が大きいため、主波が分裂波を追い越していく。主波が分裂波に重合している区間では、主波の津波高さが大きくなる。

(3) その後、主波が、比較的大きな波高の分裂波を追い越すと、主波の津波高さが低減していく。そして、弾性浮体が有する、津波高さの低減効果が発揮される。

(4) 弾性浮体の全長及び曲げ剛性率や、入射する津波の津波高さが大きいほど、津波高さの最終的な低減率が大きくなる。また、入射する津波の波長が短いほど、津波高さの最終的な低減率が大きくなる。

(5) 弾性浮体の曲げ剛性率が大きいほど、より多数の分裂波が発生し、また、主波の津波高さがより低減して、水面波となった主波の位相速度が低下する。そのため、主波が、弾性浮体を通過後、比較的大きな波高の分裂波を追い越すために必要な時間が長くなる。その結果、弾性浮体が津波高さの低減効果を発揮するまでにかかる時間が長くなる。

(6) 本稿では、構造物に対する津波の入射方向を岸向きと呼ぶ。岸沖方向に2基の弾性浮体を設置する場合、沖側の弾性浮体を通過後、水面波となった主波が分裂波と重合し、主波の津波高さが増加する。この増幅した主波の津波高さが最大となる地点に沖側端が位置するよう、岸側の弾性浮体を設置すると、2基の弾性浮体通過後の、主波の津波高さの最終的な低減率が最大となる。すなわち、複数基から構成される弾

* 鹿児島大学学術研究院理工学域

性浮体が有する津波高さの低減効果は、浮体間距離にも依存する。ただし、各弾性浮体の長さを入射波の波長に対して十分長くしておく必要がある。

(7) 弾性浮体の側方に透過して、浮体から離れていく水面波が存在し、この散乱現象も津波高さの低減に寄与する。また、湾口を塞ぐように弾性浮体を設置すると、浮体背後に回折する水面波による津波高さの増加が低減される。

上記の (4) 及び (6) において、弾性浮体に入射する津波の相対波高が大きいほど、津波高さの低減効果が大きくなるという特性に関して述べたが、本研究では、これに着目する。すなわち、図 1 に示すように、弾性浮体の沖側端付近に、潜堤のような浅瀬を配置し、これによって津波高さが増幅した津波が、弾性浮体に入射する場合を考える。

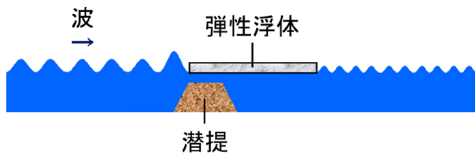


図 1 弾性浮体と潜堤を組み合わせた構造物

2. 数値解析の手法及び条件

2.1 数値解析手法

非粘性・非圧縮性流体の非回転運動を対象とし、表面波の 1 次元伝播問題を調べる。津波の入射方向を x 軸の正の方向とし、鉛直座標を z とする。水面変動を $\eta(x, t)$ 、底面位置を $b(x)$ 、そして、速度ポテンシャルを $\phi(x, t)$ とする。速度ポテンシャルを Isobe¹⁰⁾ と同様に、次式のような z に関する N 個のべき関数の重み付き級数に展開する。

$$\phi(x, z, t) = \sum_{\alpha=0}^{N-1} [f_{\alpha}(x, t) \cdot z^{\alpha}] \quad (1)$$

そして、流体運動に対して変分法を適用すると、次式のような非線形表面波方程式系が得られる¹¹⁾。

$$\eta^{\alpha} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla[(\eta^{\alpha+\beta+1} - b^{\alpha+\beta+1}) \nabla f_{\beta}] - \frac{\alpha \beta}{\alpha + \beta - 1} (\eta^{\alpha+\beta-1} - b^{\alpha+\beta-1}) f_{\beta} = 0 \quad (2)$$

$$\eta^{\beta} \frac{\partial f_{\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} \eta^{\beta+\gamma} \nabla f_{\beta} \nabla f_{\gamma} + \frac{1}{2} \beta \gamma \eta^{\beta+\gamma-2} f_{\beta} f_{\gamma} + g \eta + \frac{1}{\rho} B \nabla^2 \nabla^2 \eta = 0 \quad (3)$$

ここで、重力加速度 g を 9.8 m/s^2 とし、流体の密度 ρ を 1000 kg/m^3 とする。また、 B は、薄板状浮体の曲げ剛性率であり、流体の表面上にある弾性板の運動が線形であると仮定している。なお、Kakinuma¹¹⁾ では、多層流体を対象とした方程式系を導いているが、ここでは、1 層流体の方程式を示している。

側方境界に完全反射条件を与え、式 (2) 及び (3) を陰的スキーム¹²⁾ を適用した差分法で解いた。本研究では、式 (1) の展開項数 N を 3 とした。また、計算格子間隔 Δx を 25 m 、計算時間間隔 Δt を $4.0 \times 10^{-4} \text{ s}$ とした。

2.2 弾性浮体と潜堤を組み合わせた構造物

図 2 に示すように、一様静水深が h である水域に、薄板状の弾性浮体と、台形状の潜堤を設置する場合を対象とする。

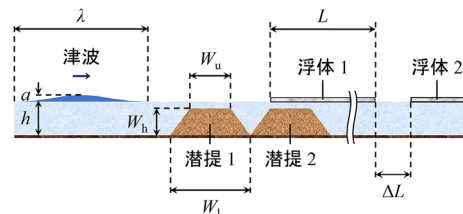


図 2 弾性浮体及び潜堤を設置した水域

本研究では、浮体を2基、または、潜堤を2基設置する場合、それぞれ同一の構造物を設置するものとする。そして、図2に示す沖側及び岸側の浮体をそれぞれ浮体1及び浮体2と呼び、同様に、沖側及び岸側の潜堤をそれぞれ潜堤1及び潜堤2と呼ぶ。

図2において、浮体1基の全長を L とする。浮体の規模や曲げ剛性率は、対象とする波の条件や、浮体の材質及び構造等を考慮して、適切な値を選ぶことになる。ここでは、浮体の曲げ剛性率 B の値は、Mega-Floatの実験時の値¹³⁾を参照して設定した。他方、潜堤の上底長を W_u 、下底長を W_l とし、堤高を W_h とする。これら浮体及び潜堤に、沖側から、波高 a 及び波長 λ の波を入射させる。そのため、式(4)で表わされる初期水面形を $0 \leq x/\lambda \leq 0.5$ に与えた。

$$\eta/a = 1 + \cos[2\pi \cdot (x/\lambda)] \text{ for } 0 \leq x/\lambda \leq 0.5 \quad (4)$$

本研究では、すべての場合において、静水深 h を 50 m とし、入射波波高 a を 5 m とした。入射波、浮体及び潜堤の計算条件を表1に記す。

3. 1基の弾性浮体と1基の潜堤を用いる場合の津波高さの低減

表1に示す Case A-1 ~ Case A-3 では、1基の浮体のみ、または、1基の浮体と1基の潜堤を設置する。浮体と潜堤を1基ずつ設置する場合には、図3に示すように、図2に示す浮体1と潜堤2を設置する。ここで、浮体の沖側端と、潜堤天端の沖側端の地点を一致させている。

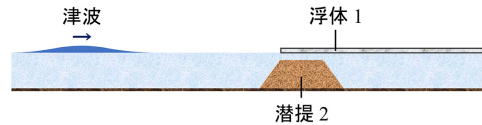


図3 Case A-1 ~ Case A-3で浮体と潜堤を併用する場合の構造物の配置

Case A-1における、相対最大水位の数値解析結果を図4に示す。ここで、相対最大水位は、各地点 x における、水位の最大値 $\eta_{1,max}$ と、構造物がない場合の水位の最大値 $\eta_{0,max}$ の比 $\eta_{1,max}/\eta_{0,max}$ である。

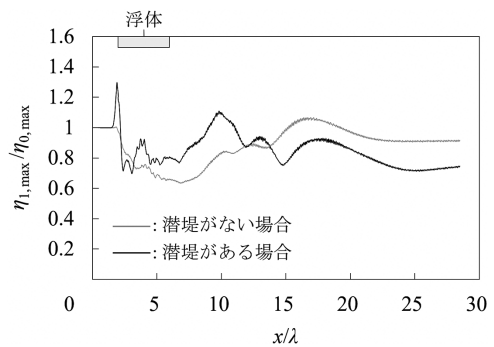


図4 Case A-1における相対最大水位の分布 (浮体は、 $2 \leq x/\lambda \leq 6$ にある。)

津波高さの低減率を次式で表わし、この最終的な値を R とする。

$$(\text{津波高さ低減率}) = (\eta_{0,max} - \eta_{1,max}) / \eta_{0,max} \quad (5)$$

図4より、潜堤がない場合には、 $R \approx 9.0\%$ であるが、潜堤を設置すると、 $R \approx 28.6\%$ になっており、潜堤の併用によって R が大き

表1 入射波、浮体及び潜堤の諸元

Case	入射波		浮体			潜堤			
	波高 a/h	波長 λ/h	基数	曲げ剛性率 $B/\rho g \lambda^4$	全長 L/λ	基数	上底 W_u/h	下底 W_l/h	堤高 W_h/h
A-1	0.1	20	1	1.02×10^{-4}	4	0, 1	6	12	0.8
A-2		10		1.63×10^{-3}	8				
A-3						1			0.4, 0.6, 0.8
B						0, 2	3	6	0.8
C			2		4	0, 1	6	12	

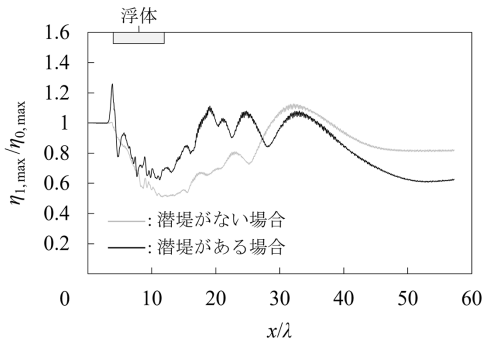


図5 Case A-2における相対最大水位の分布
(浮体は、 $4 \leq x/\lambda \leq 12$ にある。)

くなった。

また、Case A-2における、相対最大水位の数値解析結果を図5に示す。これより、潜堤がない場合には、最終的な津波高さの低減率が $R \approx 18.3\%$ であるが、潜堤を設置すると、 $R \approx 39.1\%$ となっている。Case A-2では、Case A-1よりも、浮体長の入射波波長に対する比 L/λ が大きく、 R がより大きな値になった。

更に、1基の浮体と、堤高の異なる1基の潜堤を用いるCase A-3における、相対最大水位の数値解析結果を図6に示す。最終的な津波高さの低減率は、堤高が $W_h = 0.4h$ の場合に $R \approx 21.2\%$ 、 $W_h = 0.6h$ の場合に $R \approx 26.2\%$ 、そして、 $W_h = 0.8h$ の場合に $R \approx 39.1\%$ となった。堤高が大きいくほど、 R が大きいが、これは、堤高が大きいくほど、潜堤による波高の増幅率が大きくなり、浮体の津波高さ低減効果が増加したためである。

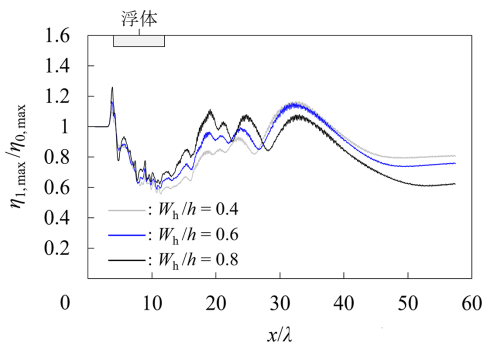


図6 Case A-3における相対最大水位の分布
(浮体は、 $4 \leq x/\lambda \leq 12$ にある。)

4. 1基の弾性浮体と2基の潜堤を用いる場合の津波高さの低減

表1に示すCase Bでは、1基の浮体のみ、または、1基の浮体と2基の潜堤を設置する。1基の浮体と2基の潜堤を設置する場合には、図7に示すように、図2に示す浮体1と、潜堤1及び潜堤2を設置する。ここで、浮体の沖側端と、潜堤2の天端の沖側端の地点を一致させ、また、潜堤1の堤底の岸側端位置と、潜堤2の堤底の沖側端位置を一致させている。

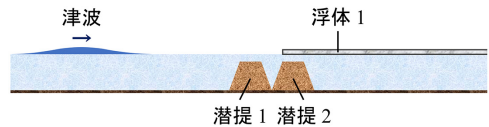


図7 Case Bで浮体と潜堤を併用する場合の構造物の配置

Case Bにおける相対最大水位の数値解析結果を図8に示す。これより、1基の浮体と2基の潜堤を併用した場合、最終的な津波高さの低減率が $R \approx 46.1\%$ であり、図5に示すCase A-2で浮体と潜堤を1基ずつ用いた場合よりも、津波高さがより低減されている。

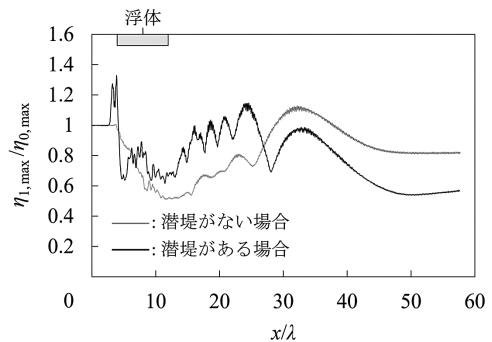


図8 Case Bにおける相対最大水位の分布
(浮体は、 $4 \leq x/\lambda \leq 12$ にある。)

5. 2基の弾性浮体と1基の潜堤を用いる場合の津波高さの低減

表1に示すCase Cでは、2基の浮体のみ、または、2基の浮体と1基の潜堤を設置する。2基の浮体と1基の潜堤を設置する場合には、図9に示すように、図2に示す浮体1及び浮

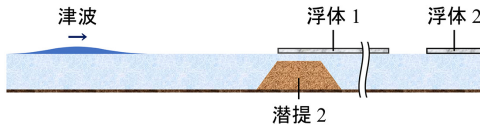


図9 Case Cで浮体と潜堤を併用する場合の構造物の配置

体2と、潜堤2を設置する。ここで、浮体1の沖側端と、潜堤天端の沖側端の地点を一致させており、また、浮体1の岸側端と、浮体2の沖側端の間の距離は、 $\Delta L = 6\lambda$ とした。

Case Cにおける相対最大水位の数値解析結果を図10に示す。これより、2基の浮体と1基の潜堤を併用した場合、最終的な津波高さの低減率が $R \approx 48.0\%$ と大きくなっている。この場合、主波が浮体1を通過した後、分裂波との重合によって主波の津波高さが大きくなった地点に、2基目の浮体の沖側端を位置させており、浮体2による津波高さの低減効果が高められた。

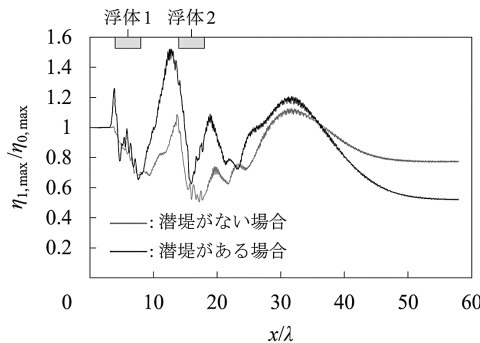


図10 Case Cにおける相対最大水位の分布 (浮体は、 $4 \leq x/\lambda \leq 8$ 及び $14 \leq x/\lambda \leq 18$ にある。)

6. 結論

弾性浮体と潜堤を組み合わせた構造物によって津波高さを低減させる方法を提案した。潜堤によって津波高さが増幅した津波を弾性浮体に入射させることにより、弾性浮体の津波高さ低減効果が増加した。また、複数基の潜堤や浮体を適切に配置することによって、津波高さを更に低減させることができることがわかった。

なお、浮体が何らかの原因で消失した場合、潜堤を越えた津波の津波高さは、入射した津波の津波高さ以下になると考えられるが、今後、このことを確認する必要がある。

助成

本研究は、JSPS 科研費 22H01136、九州大学応用力学研究所共同利用研究及び京都大学数理解析研究所共同利用研究の助成を受けて行なわれた。

謝辞

数値解析において、神戸大学の中山恵介氏が開発された数値スキームを用いた。また、国土交通省九州地方整備局の鶴留悠暉氏、並びに、南西建設株式会社の五十嵐陸氏には、彼等が鹿児島大学の研究室に所属していた際に、数値解析において御助力いただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Kakinuma, T. and Hisada, M.: A numerical study on the response of a very large floating airport to airplane movement, Eng, Vol. 4, pp. 1236–1264, 2023.
- 2) Michele, S., Zheng, S. and Greaves, D.: Wave energy extraction from a floating flexible circular plate, Ocean Engineering, Vol. 245, 110275, 2022.
- 3) Hermans, A.J.: A boundary element method for the interaction of free-surface waves with a very large floating flexible platform, Journal of Fluids and Structures, Vol. 14, pp. 943–956, 2000.
- 4) Squire, V.A., Dugan, J.P., Wadhams, P., Rotter, P.J. and Liu, A.K.: Of ocean waves and sea ice, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 27, pp. 115–168, 1995.
- 5) 劉 曉東・堺 茂樹: 大型弾性浮体下での孤立波の分裂に関する数値解析, 海岸

- 工学論文集, 第 47 卷, pp. 31-35, 2000.
- 6) 中平達也・柿沼太郎・山元 公・山下啓・村上佳広: 超大型浮体構造物の津波低減効果, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. 911-915, 2014.
 - 7) 中平達也・柿沼太郎・勘場隆嗣・村上佳広・中山恵介・柳 雄大・山下 啓: 超大型浮体構造物が有する津波高さ低減効果の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. 861-865, 2015.
 - 8) 柿沼太郎・五十嵐陸・村上佳広: 超大型浮体構造物の津波高さ低減効果, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 76, No. 2, pp. I_661-I_666, 2020.
 - 9) Kakinuma, T. and Ochi, N.: Tsunami-height reduction using a very large floating structure, In *Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications III*, CoMFoS 2018, *Mathematics for Industry* 34, Itou, H., Hirano, S., Kimura, M., Kovtunenko, V.A. and Khludnev, A.M., Eds., Springer, Singapore, pp. 193-202, 2020.
 - 10) Isobe, M.: Time-dependent mild-slope equations for random waves, In *Coastal Engineering 1994*, Edge, B.L., Ed., American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, pp. 285-299, 1995.
 - 11) Kakinuma, T.: Nonlinear interaction of surface and internal waves with very large floating or submerged structures, In *Fluid Structure Interaction II*, Chakrabarti, S.K., Brebbia, C.A., Almorza, D. and Gonzalez-Palma, R., Eds., WIT Press, Hampshire, UK, pp. 117-126, 2003.
 - 12) Nakayama, K. and Kakinuma, T.: Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 62, pp. 574-590, 2010.
 - 13) Andrianov, A.O.I.: Hydroelastic analysis of very large floating structures, Ph.D. Thesis, Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, TU Delft, 2005.