段波津波による船体に作用する波力に関する 実験的考察

榊原 繁樹¹・砂原 俊之²・田中 博通³・阿部 郁男⁴・
久保 雅義⁵・津金 正典⁶

¹正会員 東海大学教授 海洋学部航海工学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

E-mail:sakakibara@tokai-u.jp

²非会員 東海大学教授 海洋学部航海工学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

E-mail:suna@scc.u-tokai.ac.jp

³正会員 東海大学教授 海洋学部環境社会学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

E-mail:tanakah@scc.u-tokai.ac.jp

⁴正会員 常葉大学教授 社会環境学部社会環境学科 (〒417-0801 静岡県富士市大淵325番地)

E-mail:i-abe@fj.tokoha-u.jp

⁵非会員 神戸大学名誉教授 海事科学部 (〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1)

⁶非会員 前東海大学教授 海洋学部航海工学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

東北地方太平洋沖地震津波来襲に伴い係留事故を生じた大型船の被災事態調査につき、関係者へのヒアリング、津波及び船体動揺シミュレーションにより定量的な被災実態の究明を行ってきた。これらの検討から船体に作用する津波波力を推定することは難しく、その適切な評価方法を確立することが津波来襲時の船体挙動を推定するため、さらには津波対策立案で重要となることがわかってきた。そこで本研究では、係留船に作用する津波波力について、S港で津波高さ9m超の来襲により被災した9万トン級大型石炭船をモデルに、段波津波が作用する場合の実験的検討を行った。津波水平波力は水位変動及流速によく一致し、抗力項及び慣性力項に分離することでモリソン式で概ね推定できることがわかった。ただし当該抗力係数にはさらなる検討を要する。

Key Words : tsunami wave force, vessel, tsunami bore, water tank test, morison's equation

1. はじめに

著者らは東北地方太平洋沖地震津波来襲に伴い被災した超大型原油タンカー (VLCC) や石炭船など大型船を対象として、船長レポートやGPSによる実測船体位置データ等を用いて実態を検証すると共に、津波シミュレーションおよび船体動揺シミュレーションを行なって当該地震津波来襲時の船体挙動や係留索切断などの被災状況を定量的に明らかにした^{1,2)}。また係留避泊に成功した大型原油タンカー (10万トン級原油タンカー) につき、係留避泊ができた要因を分析して船舶の津波係留対策を模索した³⁾。これらの検討から、被災した係留船に作用する津波波力の推定は難しく、かつその評価方法の確立が重要となることがわかってきた。

そこで本研究では、S港で津波高さ9m超の来襲により被災した9万トン級大型石炭船をモデルに、段波状津波が作用する場合の津波波力を模型実験により計測すると共に、実験結果の検証を行った。合わせて、段波津波が

船体に作用する場合の津波波力の推定手法を検討することを目的とした。

2. 水理実験

(1) 模型船の諸元

9万トン級大型石炭船をベースに手持ちの模型船を設定した。模型縮尺は1/160程度となり、表-1のように船体諸元を設定した。

(2) 実験装置

船体に作用する津波波力を計測するため、図-1に示すように模型船を長さ38m、幅1mの二次元水槽に配置した。段波は左端部にある貯水部のゲートを急激に開放することで発生させ、船体は当該ゲートから約8mの位置に設置した。波高計は、船体前方に2本 (WG1, WG2) および後方に1本 (WG3) の容量式波高計を設置し、設置間隔は2.5mで波速の計測にも流用した。流速計は船首直前

表-1 船体諸元

		石炭船	
		実船	模型船
全長	L_{OA} (m)	229.9	1.4
垂線間長	L_{pp} (m)	220	-
幅	B (m)	38	0.34
深さ	D (m)	19.9	0.095
喫水	d (m)	10.75	0.04225
質量	M (ton)	76,000	0.017178
重心高さ	KG (m)	10.5	0.074
慣動半径	k_{xx} (m)	12.5	0.1391
慣動半径	$k_{yy}=k_{zz}$ (m)	70.4	0.3504
横傾中心	GM_T (m)	6.07	0.1926
縦傾中心	GM_L (m)	252	3.8

(a) 配置

(b) 模型船及び3分力計

図-1 模型実験の配置

の波高計（WG2）位置にプロペラ式1本を設置した（静水面下10mm）。また船体に作用する波力は、3分力計を2台船体に固定し、船首から来襲する段波による水平波力となるSurge(F_x)、鉛直波力Heave(F_z)および波力モーメントとなるPitch(M_y)を時系列レベルで計測した。

(3) 段波津波条件

段波は貯水部のゲートを急激に開放することで発生させるが、船体周りの水深 (h) は0.1mと固定した。そしてゲート内の水深 (H_0) は、表-2のように0.15m, 0.20m, 0.25m及び0.30mと段波の性状を4ケース変化させた。

上述のように発生させる段波の性状は図-2に示すように式(1), (2), (3), (4)のように表される⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

$$U = \zeta \sqrt{\frac{g(H+h)}{2H(H-\mu\zeta)}} \quad (1)$$

$$C = \sqrt{\frac{gH(H+h)}{2(H-\mu\zeta)}} \quad (2)$$

(a) 段波 (砕波段波)

(b) 波状段波

図-2 段波津波の諸元

表-2 津波実験条件

	水深 (m)			
	H_0	H_{max}	H	h
ケース1	0.15	0.143	0.128	0.10
ケース2	0.20	0.162	0.150	0.10
ケース3	0.25	0.172	0.163	0.10
ケース4	0.30	0.198	0.195	0.10

表-3 津波特性

	η_{max} (m)	ζ (m)	ζ/h	U_{max} (m/s)	Fr
ケース1	0.0426	0.0280	0.280	0.365	0.309
ケース2	0.0622	0.0500	0.500	0.495	0.393
ケース3	0.0716	0.0630	0.630	0.608	0.469
ケース4	0.0984	0.0952	0.952	1.029	0.738

$$\zeta = H - h \quad (3)$$

$$\eta_{max} = H_{max} - h \quad (4)$$

ここに U は船体直前の波高計(WG2)位置となる参照位置Sでの流速, u は船体船尾の参照位置Tにおける流速($u=0$), C は波速, H は段波が通過する参照位置Sでの水深, h は参照位置Tにおける水深($h=0.1$ m), ζ は津波高さ, μ は抵抗係数 ($\mu=1$ とした), g は重力加速度, H_{max} は波状段波の最大水深及び η_{max} は最大津波高さである。

3. 実験結果と考察

(1) 段波津波の特性

図-3に船体前方の2本 (WG1, WG2) 及び後方の1本 (WG3) の波高計で計測した水位変動の時系列を示す。

(a) $H_0=0.15\text{m}$ (ケース1)

(b) $H_0=0.20\text{m}$ (ケース2)

(c) $H_0=0.25\text{m}$ (ケース3)

(d) $H_0=0.30\text{m}$ (ケース4)

図-3 水位変動の時系列 (WG1, WG2, WG3)

(a) $H_0=0.15\text{m}$ (ケース1)

(b) $H_0=0.20\text{m}$ (ケース2)

(c) $H_0=0.25\text{m}$ (ケース3)

(d) $H_0=0.30\text{m}$ (ケース4)

図-4 流速の時系列 (WG2と同じ位置)

波高計間の段波到達時間差 (WG1とWG2) 及び (WG2とWG3) は、いずれのケースでも同じで船体周りで波速が安定していることがわかる。津波高さ ζ は、水位差(H_0-h)に対応して大きくなっている。ただしケース1の場合、最初の波は貯水部ゲートを急激に開放した際に発生した孤立波であり無視した。表-3に実験で発生させた段波状の津波特性をまとめるが、段波波高と段波前面水深比 ζ/h が0.61~0.64より小さい場合波状段波となることから⁹⁾、ケース1及び2は波状段波、ケース3及び4は砕波段波と考えられる。またケース3及び4の場合、船体からの反射波による水位上昇が25s(WG1)と21.5s(WG2)、及び24s(WG1)と20s(WG2)に顕著にみられる。

図-4に流速 (WG2位置) の時系列を示す。図-3と合わせてみると、流速は津波高さに顕著に影響し、ケース1及び2の場合波状に変動している。またケース3及び4の場合では、船体からの反射波による流速低下が21.5s及び20sにみられる。

(a) 津波高さと水位差(H_0-h)の関係

(b) 流速と津波高さの関係

(c) 波速と津波高さの関係

(d) U/C と津波高さの関係

図-5 段波津波の特性

図-5に津波高さ ζ と水位差(H_0-h)の関係を示すと共に、流速(U)、波速(C)及び流速波速比(U/C)の式(1),(2)の計算値との比較を示す。発生津波高さは、貯水部との水位差の約半分程度となり、また流速、波速及び流速波速比共に、実験値は計算値と概ね一致することがわかった。

(2) 津波波力の特性

a) 時系列

図-6に船首から来襲する段波による水平波力Surge(F_x)、鉛直波力Heave(F_z)及び波力モーメントPitch(M_y)の時系列

図-6 船体に作用する津波波力の時系列

を示す。船体に作用する津波波力の挙動を理解し易くするため、波力の生じる時刻を図-3に示した船体直前の波高計(WG2)の水位変動の開始時刻に一致させて表示した。

津波波力は図-3、-4に示した水位変動及び流速によく一致して変動していることがわかる。そして水平波力 Surge(F_x)及び波力モーメント Pitch(M_y)は、全てのケースで段波が船体船首に達した時に衝撃的に発生することがわかった。一方鉛直波力 Heave(F_z)は、段波が船首部に到達後徐々に上昇し、その後一定化している。これは津波で船体が水没することで発生する余剰浮力が鉛直波力 Heave(F_z)に概ね相当しており、ケース3及び4では船体は全没する状況であった。本来船体は、当該段波来襲時に水位に合わせて上昇するが、支持固定されているため水没して過大な水平波力が生じている可能性がある。また後述の図-9(b)に示す最大 Heave 波力はケース4でもさらに増加しており、余剰浮力以外の要因も考えられる。図-7、8にケース2(波状段波)及びケース3(碎波段波)の実験状況を示す。

b) フルード数、水平波力、鉛直波力及び無次元水平波圧の関係

図-9に式(5)に示すフルード数および最大 Surge 波力の津波高さに対する実験結果を示すと共に、朝倉ら⁷⁾の検討に則して、フルード数と無次元水平波圧の関係をまとめる。図-9(b)には最大 Heave 波力も合わせて示している。図-9(c)の波圧($P_x=F_x/A_s$)算出に際しては、津波来襲時の船体没水正面投影面積(A_s)をWG2での水位データと映像か

ら求め、また船幅(B)から没水喫水($ds=A_s/B$)を設定した。フルード数1.0未満の実験条件であったことから無次元波圧は概ね1.0となったものと考えられる。

$$Fr = \frac{U_{\max}}{\sqrt{gH_{\max}}} \quad (5)$$

(a) 波高計(WG2)を段波通過

(b) 船体船首部に段波到達

図-7 試験状況 (ケース2: $H_0=0.20\text{m}$, $h=0.1\text{m}$)

(a) 波高計(WG2)を段波通過

(b) 船体船首部に段波到達

図-8 試験状況 (ケース3: $H_0=0.25\text{m}$, $h=0.1\text{m}$)

(a) 津波高さとフルード数の関係

(b) 津波高さと最大水平及び鉛直波力の関係

(c) フルード数と無次元水平波圧の関係

図-9 フルード数、水平波力、鉛直波力及び無次元波圧の関係

(3) 津波波力の推定

船舶などの浮体に作用する津波波力に関する検討は、池谷らも同様に水理模型実験により行っている⁸⁾。しかし津波は長周期波として扱っていた。そこで段波津波作用時のSurge波力(水平波力)の推定方法として、モリソン式による推定を試みる。ここに波力および流速の実験結果を用いて、式(6), (7), (8)のように波力を抗力項及び慣性力項に分離した。これに際しては抗力係数および慣性力係数を実験的に設定した。

$$F_x = Fd_x + Fm_x,$$

$$Fd_x = 0.5 \cdot \rho \cdot C_{dx} \cdot A_x \cdot U^2, Fm_x = C_{mx} \cdot M \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \quad (6)$$

$$A_x = A_x(d_s) \quad (7)$$

$$M = \rho \cdot V(d_s) \quad (8)$$

ここに Fd_x は抗力成分、 Fm_x は慣性力成分、 ρ は流体密度、 C_{dx} は抗力係数、 A_x は津波高さと変動する没水正面投影面

積、 C_{mx} は慣性力係数、 M は船体質量、 V は没水体積、及び ds は津波来襲時の喫水である。

抗力項 Fd_x は図-6に示した津波波力の初期の衝撃的な変動以降の定常波力部分と考えた。そして抗力係数 C_{dx} は図-4に示した流速の当該対応時刻の流速を用いて式(9)のように算定した。

$$C_{dx} = \frac{2Fd_x}{\rho \cdot A_x \cdot U^2} \quad (9)$$

一方で、加速度は図-4に示した流速の時間微分から算出し、そして余剰波力分 $F_x - Fd_x$ を慣性項 Fm_x と考え、式(10)のように慣性力係数 C_{mx} を算定した。

$$C_{mx} = \frac{F_x - Fd_x}{M \cdot \dot{U}} \quad (10)$$

(a) ケース2 ($H_0=0.20\text{m}$, $h=0.1\text{m}$)

(b) ケース3 ($H_0=0.25\text{m}$, $h=0.1\text{m}$)

図-10 津波水平波力の推定

図-11 抗力係数及び慣性力係数の特性

一例として図-10にケース2及び3の再現結果を示す。どちらのケースも津波波力の実験結果をよく再現していることがわかる。

(4) 抗力係数及び慣性力係数の特性

図-11に津波波力推定で使用した式(9)及び(10)で算定した抗力係数及び慣性力係数を流速ごとに示す。慣性力係数は $C_{mx}=0.15$ とほぼ一定である。一方抗力係数 C_{dx} は、流速により変動し、別途本学回流水槽で行った当該模型船の流圧試験結果での約0.24に較べてかなり大きな値となっている。なお当該回流水槽で得られた抗力係数はOCIMFに示された値⁹⁾に類似している。図-11に得られた抗力係数に関しては、流速の鉛直分布特性の把握などさらなる実験的検討が必要と考えている。

4. おわりに

本研究では、S港で津波高さ9m超の来襲により被災した9万トン級大型石炭船をモデルに、段波状津波が作用する場合の津波波力を模型実験により計測すると共に、段波津波が船体に作用する場合の津波波力の推定を試みた。津波水平波力は水位変動及び流速によく一致して変動することから、抗力項と慣性力項に分離することにより、モリソン式で概ね推定できることを確認した。ただ

し抗力係数が流圧試験結果よりかなり大きな値となり、かつ流速により変動する結果となったことからさらなる検討を要する。今後追加の模型実験結果と合わせて、さらにはヒアリング調査¹⁰⁾との照合を通じて、当該係留船の定量的な被災実態調査を行いたく考えている。

参考文献

- 1) 榊原繁樹, 阿部郁男, 津金正典, 久保雅義: 東北地方太平洋沖地震津波による栈橋係留の超大型原油タンカーの被災実態, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I-816-I-820, 2012.
- 2) 榊原繁樹, 阿部郁男, 津金正典, 久保雅義: 東北地方太平洋沖地震津波来襲時の栈橋係留大型石炭船の挙動再現について, 日本航海学会論文集, 第 131 号, pp.89-99, 2014.
- 3) 榊原繁樹, 阿部郁男, 津金正典, 久保雅義: 東北地方太平洋沖地震津波における大型原油タンカーの係留避泊実態, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I-871-I-875, 2013.
- 4) 福井芳朗, 白石英彦, 中村充, 佐々木泰雄: 津波の研究(I) -段波津波の波速について-, 海岸工学講演会講演集, 第 9 回, pp.44-49, 1962.
- 5) 室田 明, 岩田好一朗: 段波の変形に関する研究, 土木学会論文集, 第 160 回, pp.49-58, 1968.
- 6) 松富英夫: 移動跳水 (波状段波非) 発生条件の検討, 水理講演会論文集, 第 33 回, pp.271-276, 1989.
- 7) 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: 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, 第 47 巻, pp.911-915, 2000.
- 8) 池谷毅, 朝倉良介, 藤井直樹, 大森政則, 武田智吉, 柳沢賢: 浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.761-765, 2005.
- 9) OCIMF: *Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs*, 2nd Edition, Witherby & Co., Ltd., 1994.
- 10) 榊原繁樹, 阿部郁男, 久保雅義, 津金正典: 東日本大震災で被災した隣接 2 隻の大型石炭船に來襲した津波および船体に作用する津波波力に関する一考察, 日本航海学会論文集, 第 134 号, 印刷中, 2016.

(2016.3.16 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON TSUNAMI WAVE FORCE OF A VESSEL DUE TO TSUNAMI BORE

Shigeki SAKAKIBARA, Shunji SUNAHARA, Hiromichi TANAKA, Ikuo ABE, Masayoshi KUBO and Masanori TSUGANE

In the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami, the tsunami disasters occurred in many vessels moored along the terminals inside the harbor basins. It is required how to express and estimate the tsunami wave force on those vessels. An experimental study on the tsunami wave force for a vessel which is modeled as a 90,000DWT class coal carrier has been conducted in two-dimensional water tank during a tsunami bore. The surface elevation, current and wave forces acting on the fixed vessel in head seas have been measured in several established bores. The property of the tsunami bore and wave forces are investigated, and a practical estimation method of tsunami wave force of the vessel is also demonstrated by using Morison's formula, and compared with that of observed one.