



津波来襲時に岸壁係留船舶が受ける流体力に関する実験的研究

米田, 翔太

橋本, 博公

小林, 英一

(Citation)

日本船舶海洋工学会論文集, 26:255-265

(Issue Date)

2017-12

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005035>

津波来襲時に岸壁係留船舶が受ける流体力に関する実験的研究

学正会員 米田翔太* 正会員 橋本博公*
正会員 小林英一*

Experimental Study on Hydrodynamic Forces Acting on a Ship Moored alongside a Quay Wall under Tsunami Attack

by Shota Yoneda, Student Member Hirotada Hashimoto, Member
Eiichi Kobayashi, Member

Summary

Countermeasures of ships for tsunamis became a major concern for ship operators after the Great East Japan Earthquake in 2011. Evacuation from ports is generally recommended to avoid tsunami disasters. However staying in port with enhancement of mooring lines could be another option. In this study, a dedicated model experiment to tow a quay wall and a ship model together was conducted to estimate hydrodynamic forces acting on a containership alongside a quay wall under tsunami attack, to discuss the required strength of mooring against tsunami flows. Finally, a simple conversion formula was proposed based on the experimental results, to estimate the wind speed equivalent to the tsunami-induced hydrodynamic forces.

1. 緒 言

近い将来に発生すると予想されている南海トラフ地震およびその津波に対する船舶避難の研究が進められている。東日本大震災以降は、想定される地震・津波の規模が大幅に引き上げられたことにより、巨大津波に対する対策と研究が急務とされており、係留中の船舶の避難行動としては、津波来襲前に港外避難することを基本としてきた¹⁻⁶⁾。しかし、東日本大震災における鹿島港での船舶の港内漂流の事例¹⁾のように、港外避難を達成することができずに、岸壁係留状態で津波に耐える状況も考えられる。岸壁係留船舶の津波対策としては、係留強化が推奨されており、簡易計算機⁷⁾が提案されるに至っている。また、地震・津波の規模が非常に大きい場合を除いては、港外避難よりも係留強化のみで津波対策を行う方が低コストであり、その後の復旧も容易となるため、注目度が高まっている。

既存の研究としては、増田ら^{8,9)}が粒子法のひとつであるMPS法を用いて、岸壁係留中の船舶に津波が襲来した際のシミュレーションを行っている。粒子法は、船舶が岸壁に乗

り上げるような極端な状況予測に対しては非常に有効であるが、港湾内を船舶が漂流する場合や岸壁付近での船体に働く流体力推定に対しては、その限りではない。極端に水位変動の大きい巨大津波を除けば、水位変動よりも水平流に注目して係留強化を議論するのが自然である。この点については、岸壁係留ではなく沖桟橋係留が行われたVLCCの鹿島港の事例について、榎原ら^{10,11)}によって研究されており、船舶に働く流体力については、模型船の浅水斜航試験から得られる抵抗係数が主に用いてられている。沖桟橋は津波による流れをあまり阻害しないため、船体に作用する流れを一様流とみなすことができるが、岸壁に係留している船舶に津波のような強い流れが作用する場合には、このような方法を用いることができない。そのため久保ら¹²⁾によって、岸壁の影響も考慮したストリップ法の拡張が行われている。しかし、津波のような長周期の現象については、流体现象を「波」ではなく「流れ」とみなす方が自然であると考えられる。

岸壁付近での流れや流体力の研究に関しては、操縦性の問題として知られている側壁影響¹³⁾の研究が過去に多く行われている。これは、運河などで船舶が側壁に近い場所を航行する際に船体が側壁に吸い寄せられる効果として知られている。しかし、これは岸壁と船舶との相対速度がゼロとなる津波下での係留状態とは環境が異なるため、従来の固定壁と移動船舶に対する側壁影響の成果をそのまま津波現象に用

* 神戸大学海事科学研究科

いることは早計であろう。また、井関ら¹⁴⁾の回流水槽の側壁を用いた研究は係留船舶と津波現象に似た実験環境ではあるが、操縦性に主眼を置いており、側壁と船側との間には半船幅ほどの距離があるため岸壁係留状態とは言い難い。

以上より、岸壁に係留している船舶に津波のような強い水平流が作用する場合に、船体にどのような流体力が発生するかは明らかになっていない。そこで、本研究では、津波シミュレーションを実施し、岸壁係留船舶にどのような津波が来襲するかを調査した上で、模型船と岸壁の位置関係を保ったままで両者を曳航する水槽試験を実施し、船体に作用する流体力の計測を行った。さらに、計測された流体力を用いて、津波対策としての係留強化を議論するために、強風対策との比較検討を行った。

2. 津 波 予 測

2.1 津波伝播シミュレーション

はじめに、東日本大震災において鹿島港を襲った津波及び、南海トラフ地震で発生が想定されている津波が大阪港にどのように来襲するかについて、流速と流向に着目して調査を行った。

東日本大震災における津波波源モデルについては、佐竹・藤井ら¹⁵⁾のモデルとし、内閣府提供の海底地形データを用いて馬場ら¹⁶⁾が作成したJAGURSを用いて、非線形分散波論に基づき遡上を含めた津波伝播シミュレーションを鹿島港に対して行った。ただし、防波堤については、海底地形として含まれている情報のみを用いることとし、特別な処理は行わない。大阪港については、内閣府¹⁷⁾が作成した南海トラフでの断層モデル（11ケース）の中から大阪湾に最も巨大な津波が襲来すると想定されるケース3を用いて、鹿島港と同様のシミュレーションを行った。

2.2 鹿島港

50[m]メッシュで計算を行った鹿島港の津波伝播シミュレーション結果について、地震後約4000秒で発生した強い引き波をFig. 1に示す。また、地震発生後の8000秒間に現れた最大流速の分布をFig. 2示す。この分布図より、鹿島港における最大流速は約4.5[m/s]と推測される。水路部の中央では流速が早くなり、岸壁近傍では流速がやや遅くなる傾向がある。流れの方向については、港湾の奥部や角部を除くと、港湾入口の大型船が多く係留されるエリア¹⁰⁾¹¹⁾では、岸壁の方向とほぼ平行に流れが発生していることがわかる。

2.3 大阪港

30[m]メッシュで計算を行った大阪港の津波伝播シミュレーション結果について、地震後約7500秒での第一波の押し波をFig. 3に示す。また、地震発生後の10000秒間に現れた最大流速の分布をFig. 4に示す。夢洲-咲洲間の防波堤の間を通過する津波の流速は約4[m/s]であり、咲洲北側の岸壁付

近では局所的に早い流速も発生している。天保山の南側の狭隘な水路部では5[m/s]以上の流れが発生している。

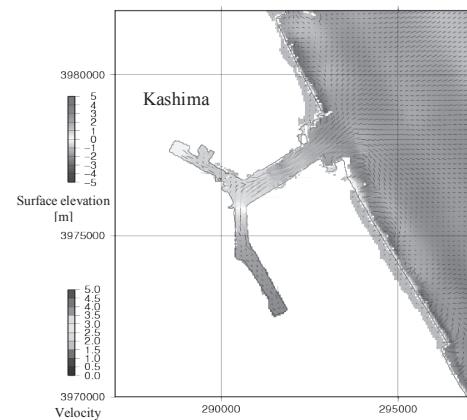


Fig. 1 Water elevation and velocity vector of tsunami at Kashima port (abt. 4000 sec).

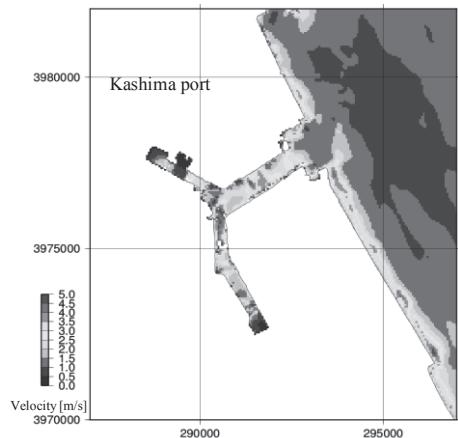


Fig. 2 Maximum magnitude of flow velocity at Kashima port.

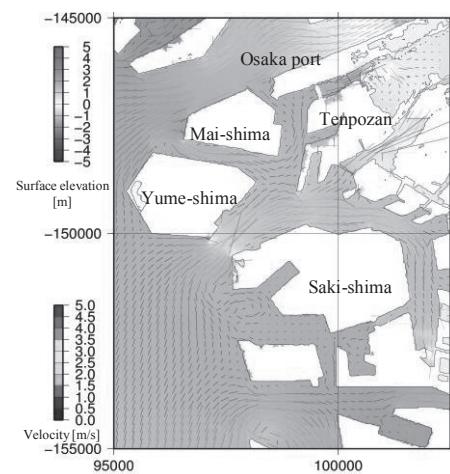


Fig. 3 Water elevation and velocity vector of tsunami at Osaka port (abt. 7500 sec).

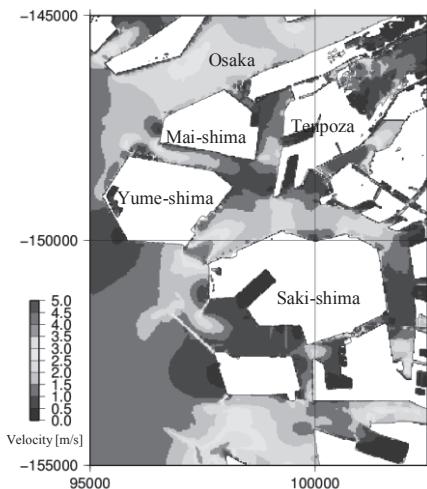


Fig. 4 Maximum magnitude of flow velocity at Osaka port

2.4 係留中船舶を襲う津波流

津波伝播シミュレーションの結果から、岸壁係留の船舶に作用する津波の流れについて考察する。

流れの方向については、岸壁にほぼ平行に往復することが分かる。大型船の係留は主に入船であるため、港外からの津波を船尾から受ける状態を考慮すれば良いと思われるが、鹿島港のFig. 2 の事例より、強い引き波が作用する可能性もあるため、前後両方の流れを考慮しなければならないであろう。なお、岸壁の端部に係留すると、船舶に対して斜め方向から流れが作用する可能性もあるが、これは非常に複雑な流れとなり、実験での再現が難しいため、本研究では岸壁に平行な流れのみを取り扱う。

次に、津波流の流速については、Fig. 2 及び Fig. 4 の結果から、大型船が係留するエリアの水路中央部では最大で約 4.5[m/s]の流れが現れる。シミュレーション結果を見ると岸壁近傍になると流速が幾分下がるようであるが、これは 50[m]及び 30[m]のメッシュによる計算結果であり、さらにナビエストークス方程式を 3 次元的に計算したものではなく、長波近似を用いた計算結果であるため、岸壁付近の流速分布の詳細については不明である。さらに、この計算結果は、防波堤の影響を過小評価する傾向にあり、より狭まった水路を津波が伝播すると局所的に速い流速が発生することも考えられるため、模型実験で使用する基準流速は 4.5[m/s]と定めた。

3. 模型実験

3.1 実験概要

本研究では、大型船かつ岸壁係留の必要があるコンテナ船¹⁸⁾を対象とした。Table 1 に主要目を示す。実験時には舵お

よびプロペラは取り付けていない。

Table 1 Principal particular of subject ship.

	Model	Full scale
Length: L [m]	2.62	262.0
Breadth: B [m]	0.4	40.0
Draught FP: d_{FP} [m]	0.117	11.7
Draught AP: d_{AP} [m]	0.129	12.9
Depth: D [m]	0.245	24.5
Displacement: W [ton]	0.7602	76000
Block coefficient: C_b	0.590	0.590

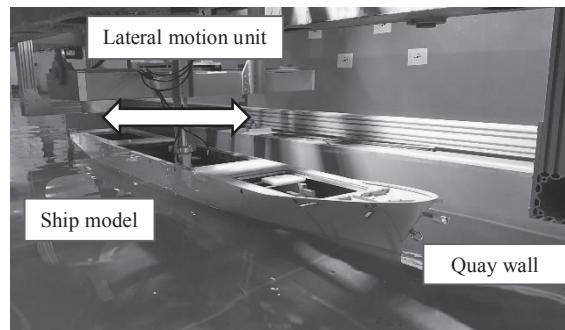


Fig. 5 Ship model and vertical wall imitating quay wall.

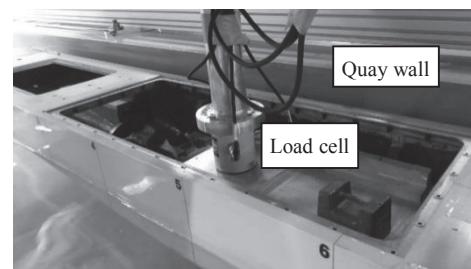


Fig. 6 Load cell for measurement of hydrodynamic force.

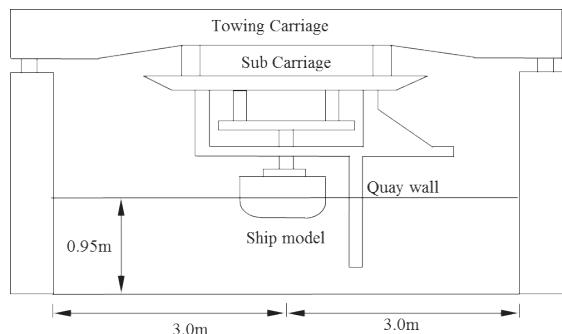


Fig. 7 Schematic view of experimental arrangement

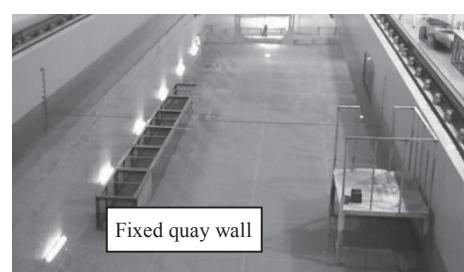


Fig. 8 Fixed vertical wall.

模型実験は神戸大学の浅水槽(長さ 60[m]×幅 6[m])にて行った。曳航に用いる岸壁模型は長さ 5.25[m], 幅 0.1[m], 高さ 0.65[m]の塩化ビニル製である。曳航岸壁の長さは船長の 2 倍, 水面下の深さは模型船の喫水の 4 倍を確保し, 両端は角部からの剥離渦の低減のため丸みをもたせてある。この曳航岸壁を浅水槽の曳航台車に吊り下げる形で取り付けた。実験では模型船と曳航岸壁との距離を変化させる必要があり, 過去の実験¹⁹⁾で用いた一定加速度横移動装置を使用することとした。3 分力計(定格 100[N], 10[Nm])は模型船の重心位置に取付け, 模型船は完全固定の状態にて曳航した。

Fig. 5, Fig. 6 に曳航岸壁と模型船を取り付けた様子と 3 分力計の詳細を示し Fig. 7 に全体像を示す。さらに、操縦性分野における一般的な側壁影響を計測するために、約 5[m]の垂直側壁を水槽中に設置した様子を Fig. 8 に示す。

3.2 実験条件

曳航速度は、前節の検討に従って 4.5[m/s]を基準とした。模型船スケールでは 0.45[m/s]に相当する。この速度を基準とし, 0.5 倍の 0.225[m/s]と 1.5 倍の 0.675[m/s]の 3 種類を用いた。水深は、一般に水深影響が十分に小さいとみなせる深さとして, $H/d > 5$ となる 0.95[m]とした。実際には港湾内の岸壁に係留されている船舶は船底と海底面が近い浅水状態にあるが、海底面までを再現した巨大な模型を曳航台車に取り付けて曳引することは困難であるため、本研究では浅水影響を含まない純粋な岸壁影響を対象とした。

岸壁から模型船の側面までの距離については、防舷材や岸壁の構造によって様々であり、また岸壁係留状態からの離岸や漂流も視野に入れて、5[mm]を最接近距離とし、横移動装置のストロークの最大値である 550[mm]までとした。その間については計測結果の距離による変化の大小に応じて適宜設定した。前節の検討によって、港湾内に来襲する津波流は岸壁に対して平行な流れが主流と確認できたので、今回は、曳航岸壁の長手方向と模型船の曳航方向(津波が来襲する方向)を一致させた状態のみの実験であり、岸壁に対して角度を持つ流れは取り扱わない。以下、前進方向とは船の船首方向から後方への津波を受ける状態を指し、後進方向とは船の船尾方向から前方への津波を受ける状態を指す。ただし、船舶が係留状態から津波等の外力によって漂流状態となり、岸壁に対して角度をもつことも考えられる。そのため、流入角を持った状態での曳航実験も行った。

3.3 座標系

本実験および解析で使用する諸量および座標系を Fig. 9 に示す。曳航岸壁は船舶の左舷側に取り付けた。長手方向の取り付け位置は、曳航岸壁の中央と模型船の重心とを一致させた。横方向の位置は、岸壁と船体重心位置との距離 d_w を船

幅 B で除した無次元値を用いている。また曳航方向と模型船とが成す角度を流入角とし α とする。

さらに、計測された流体力(F_x, F_y, M_z)の方向は船体固定座標系ではなく流入角 α に関わらず曳航方向を基準にしており、式(1)を用いて無次元化した。さらに、岸壁が存在することによる影響だけを抽出するために、式(2)のように曳航岸壁を設置しない状態での流体力を差し引き、解析では式(3)で無次元化した値を用いる。

$$C_x, C_y = \frac{F_x, F_y}{\rho L d U^2}, \quad C_{m_z} = \frac{M_z}{\rho L^2 d U^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta F_x &= F_{xwall} - F_x, \\ \Delta F_y &= F_{ywall} - F_y, \\ \Delta M_z &= M_{zwall} - M_z \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta C_x, \Delta C_y = \frac{\Delta F_x, \Delta F_y}{\rho L d U^2}, \quad \Delta C_{m_z} = \frac{\Delta M_z}{\rho L^2 d U^2} \quad (3)$$

ρ	: Water density [kg/m ³]
d	: Ship mean draught [m]
U	: Towing speed [m/s]
F_x, F_y	: Measured force in X and Y direction without quay wall [N]
M_z	: Measured moment around Z direction without quay wall [Nm]
F_{xwall} , F_{ywall}	: Measured force in X, Y direction with quay wall [N]
M_{zwall}	: Measured moment around Z direction with quay wall [Nm]
ΔF_x , ΔF_y	: Force of wall effect in X, Y direction [N]
ΔM_z	: Moment of wall effect around Z direction [Nm]

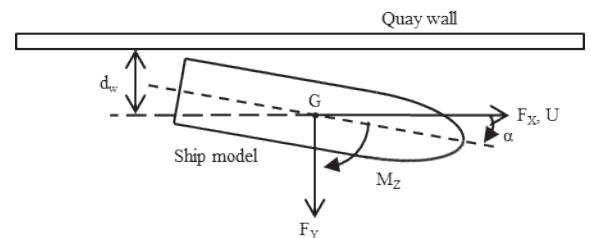


Fig. 9 Coordinate system.

4. 実験結果

4.1 岸壁なし

本研究の目的は、岸壁の有無による影響を調査するものであり、最も基本的なデータとなる岸壁を設置していない状態での試験を行った。曳航岸壁を取り付けずに行った斜航試験の結果を式(1)を用いて無次元化し、各速度と斜航角ごとにプロットした結果を Fig. 10 に示す。凡例中の速度が正の場合は前進方向、負の場合は後進方向の実験結果を意味する。また斜航角と Fig. 9 の流入角 α は本質的に同じである。

Fig. 10 を見ると、全体的には斜航角が 10°まではほぼ直線

的な変化をしているため線形とみなせるが、 15° では非線形性が無視できない。また、設定速度ごとの変化は無次元値ではほぼみられなかった。前進・後進の違いに注目すると、前後力および横力は曳航方向に寄らず大きさがほぼ同じであるが、回頭モーメントは、船型の前後非対称性により着力点が異なるため、大きな差が生じる結果となっている。

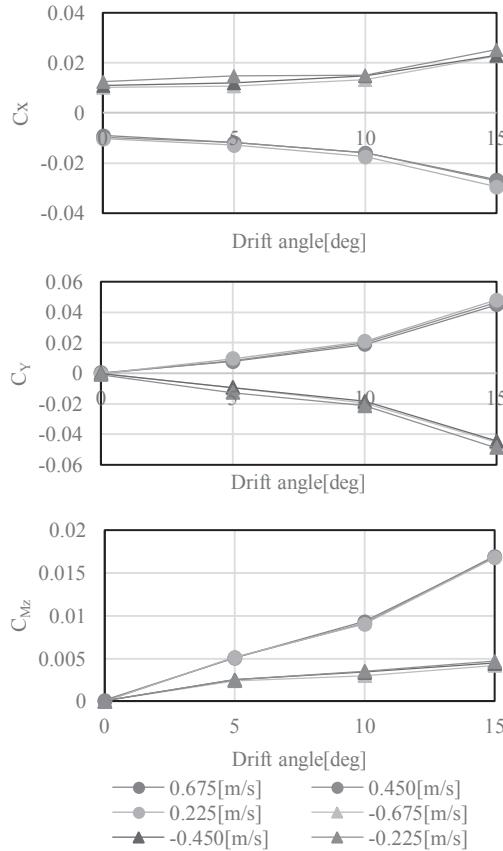


Fig. 10 Measured hydrodynamic force without quay wall.

4.2 岸壁有り

模型船を水槽の幅方向の中心に設定し、曳航岸壁に対して平行かつ船体中央が曳航岸壁の中央に位置するように模型船を取り付けて、模型船と岸壁との距離を変化させながら曳航試験を行った。岸壁の存在によって引き起こされた流体力の無次元値を Fig. 11 に示す。模擬岸壁と船側との最接近距離は $5[\text{mm}] (d_w/B = (5+B/2)/B = 0.5125)$ であり、再大距離は $550[\text{mm}] (d_w/B = 1.875)$ であった。

設定速度の違いによる変化については、 $0.45[\text{m/s}]$ と $0.675[\text{m/s}]$ ではよく一致しているが、 $0.225[\text{m/s}]$ の結果は異なる傾向となっている。これは、模型船と曳航台車を完全に固定しており、台車側のノイズを拾い易く、さらに低速では流体力が小さくなるために S/N 比が悪くなり、幾分信頼性に欠ける計測結果となった可能性がある。また、低速での計測結果は他の計測結果よりも大きい値となる傾向があり、レイ

ノルズ数影響が含まれている可能性も懸念されるため、 $0.225[\text{m/s}]$ の結果は割り引いて考えるべきであろう。

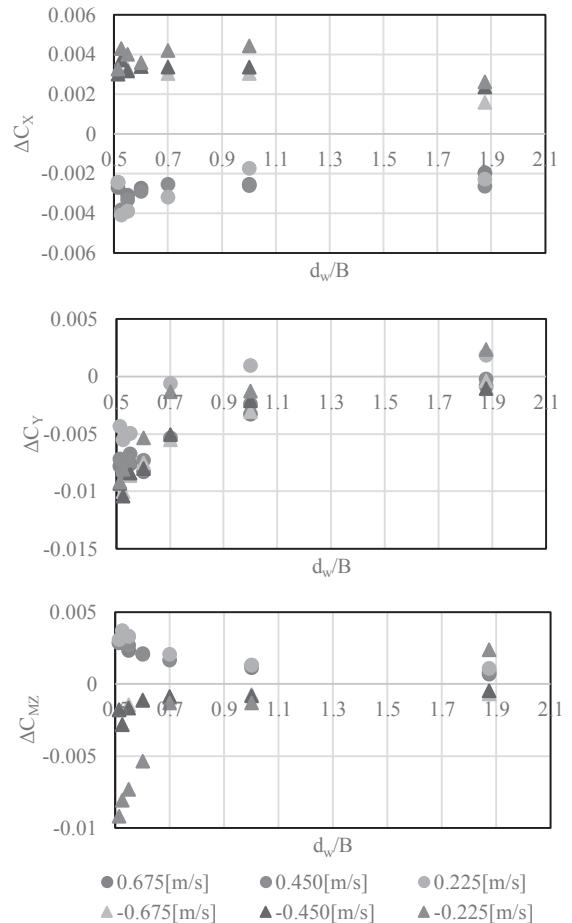


Fig. 11 Hydrodynamic force due to existence of quay wall.

前後方向の力については、計測した距離の範囲内では距離に依存せずほぼ一定の力が働いていることがわかる。計測されたトータルの力に対する岸壁影響の割合は、約 25% であった。

横方向の力については、前進・後進方向ともに計測結果が負であることから、岸壁側に押し付ける向きに力が生じており、距離が近いほど大きくなる傾向にある。前進時の最大値は距離 $d_w/B=0.525$ 、後進時の最大値は距離 $d_w/B=0.55$ で発生しているが、それよりも近い距離では逆に横力は小さくなっている。これは曳航岸壁と模型船側との距離が小さすぎるため、両者の隙間への流入が著しく妨げられることによって流体现象に変化が生じたこと、曳航岸壁に発生した境界層との干渉などが原因として考えられる。

回頭モーメントの結果をみると、岸壁との距離が近いほど大きなモーメントが発生しており、その向きは、津波が流入してくる側が岸壁から離れる方向に作用することがわかる。その最大値は、前進後進に関わらず $d_w/B=0.525$ で発生している。

以上のことから、岸壁係留中の船舶に津波の強い流れが作用した場合、流体力は岸壁に対して船舶を押し付ける方向に作用し、流れの上流側が離岸する方向に回頭モーメントが働くことがわかった。

4.3 模型船の取り付け位置の影響

前項では模型船を曳航岸壁の中央に取り付けた実験を行ったが、ここでは模型船の取り付け位置を前後方向に 1[m] 変化させることで、取り付け位置の影響調査を行った。前後に 1[m] 移動させても、船首船尾は曳航岸壁からはみ出るところはない。

船首尾および岸壁からの造波が顕著となる最大の曳航速度 0.675[m/s] の実験結果について、前進方向を Fig. 12、後進方向を Fig. 13 に示す。凡例の f1 は模型船を前方に 1[m]、b1 は後方に 1[m] 移動させた結果であり、c は既出の中央位置での結果を示している。

横力については、中央位置に対して、前進時の b1 の方が絶対値が大きく、f1 は小さい。一方、後進時には f1 の方が大きく、b1 は小さい。このことから、流れに対して中央より岸壁後方に模型船を設置すると干渉力は大きくなる傾向にあり、前方に配置すると小さく見積もる傾向にあり、曳航岸壁が作り出す境界層により、船体両舷を通過する流体の速度差によって横力が生まれていると考えられる。

次にモーメントについては、前進時の b1 が最も小さく、後進時には f1 が最も小さい。このことから、後方に配置すると干渉力を小さく見積もる傾向にある。おそらく、モーメントは側から船体と曳航岸壁との間の流速や船尾流れや曳航岸壁後流による影響だと考えられる。

これらの結果から、前進方向・後進方向ともに、中央に設置した結果に対して多少の増減はあるものの、変化の傾向はほぼ一致する結果となっている。この傾向は設定速度を変更しても同様であった。

岸壁を曳引した際の航走波の影響や船尾流れと岸壁の干渉影響などはあまり大きくなかった。

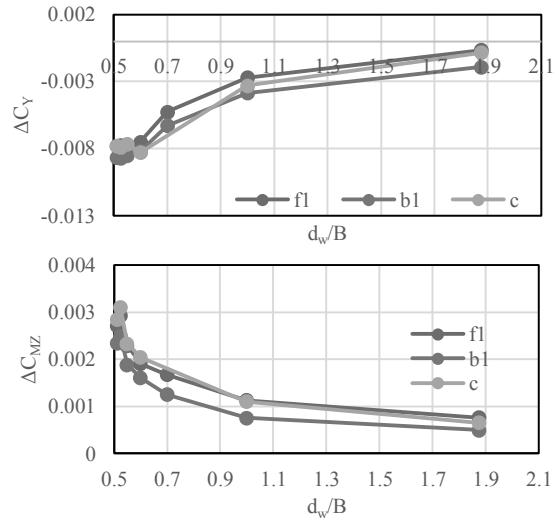
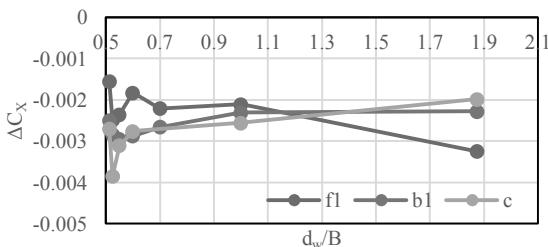


Fig. 12 Influence of mount position of ship at 0.675[m/s] (forward).

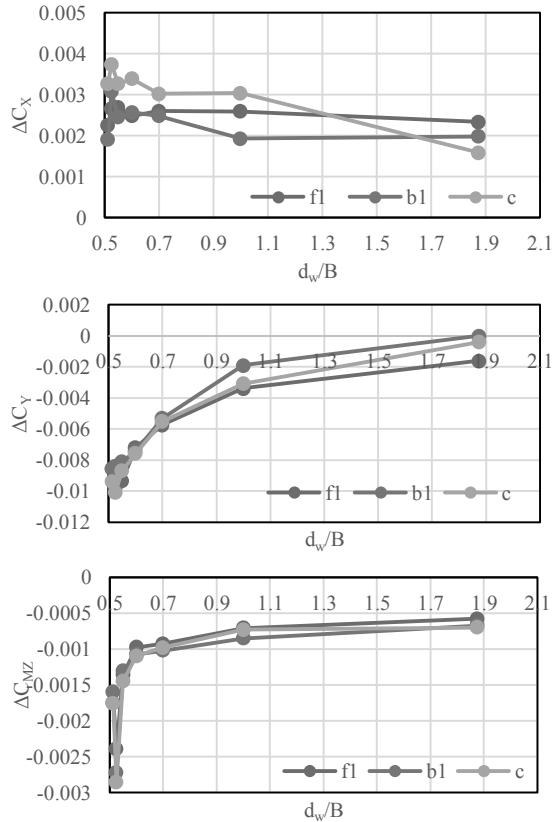


Fig. 13 Influence of mount position of ship at 0.675[m/s] (backward).

4.4 固定岸壁との比較

Fig. 8 に示した水槽内に固定した岸壁を用いて、操縦性分野において側壁影響を計測する場合と同様に船舶と岸壁との相対速度がある状態での実験を行った。設定速度を前述した実験と同じにして、曳航台車が固定岸壁の手前から加速し、一定速度になった後に固定岸壁中央を通過する 2 秒間の計測結果の平均値を側壁影響としてまとめた。最接近距離は、模型船が固定岸壁通過時に瞬間に大きな力を受けて移動

する恐れがあったため、 $d_w/B=0.55(20[\text{mm}])$ とした。Fig. 14 に一例として、速度 $0.45[\text{m/s}]$ 、 $d_w/B=0.55$ での回頭モーメントの計測結果を示す。計測結果にはノイズが含まれるもの、解析に使用した区間では概ね定常とみなすことができる。

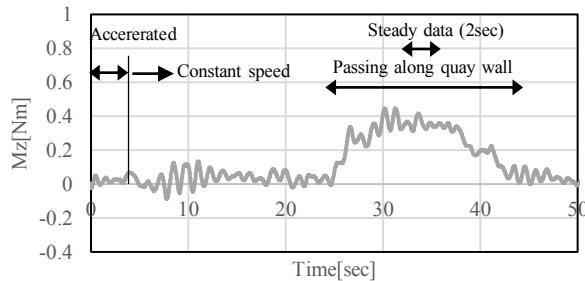


Fig. 14 Time history of measurement using fixed quay wall
($0.45[\text{m/s}] d_w/B=0.55$)

Fig. 15 に前進方向、Fig. 16 に後進方向の実験結果を示す。比較のために曳航岸壁の実験結果の $0.45[\text{m/s}]$ と $0.675[\text{m/s}]$ の各距離における平均値をプロットした。ただし、4.2 章で述べた理由により、ばらつきの大きい $0.225[\text{m/s}]$ の結果は含めていない。

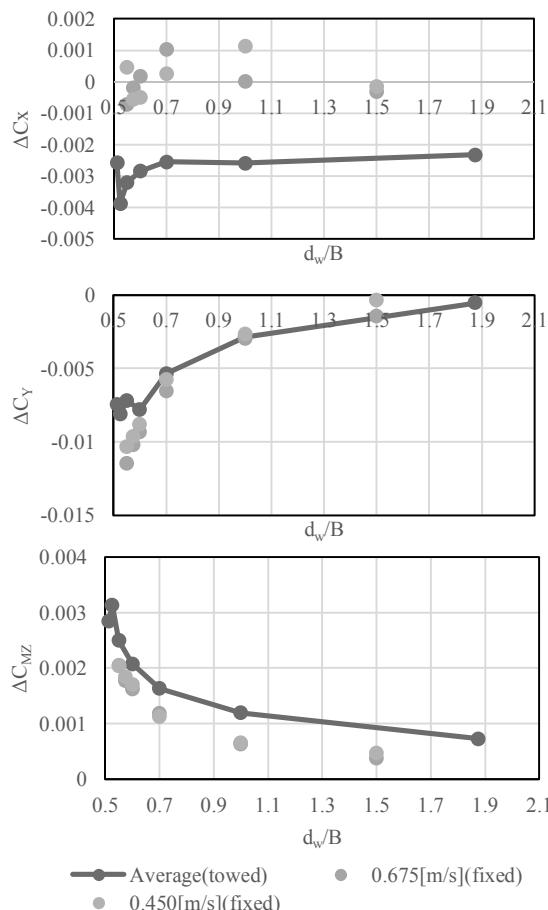


Fig. 15 Comparison of hydrodynamic force between towed and fixed walls (forward).

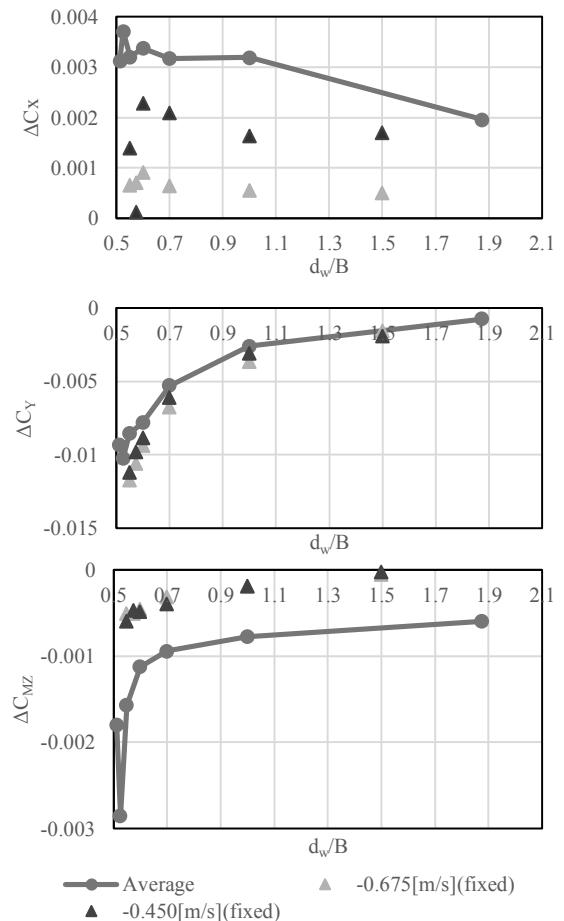


Fig. 16 Comparison of hydrodynamic force between towed and fixed walls (backward).

前進方向の解析結果について、曳航岸壁と固定岸壁の結果には岸壁との距離に関わらず一定の差が生じている。これは両者で船体周りの流速分布の差が大きいことを示しており、岸壁と船体の相対速度の有無が重要であることを意味している。次に横力に注目すると、岸壁近傍では曳航岸壁を用いた場合よりも大きい解析結果となっている。最後に回頭モーメントに注目すると、固定壁を用いた結果は曳航岸壁に対して距離によらず過小評価する結果となった。

次に後進方向の結果をみると、全体的な傾向としては前進方向と同様の傾向が得られた。特に回頭モーメントについては、固定岸壁を用いた実験ではかなり過少評価する結果となった。船体形状の前後非対称性により大きな差が生じたが、実際の港では入船係留がほとんどであるため、外洋側から侵入してくる津波は本実験における後進方向となる。したがって、固定壁を用いた過去の側壁影響に関する実験結果や知見を用いると、回頭モーメントを過小評価する危険があることがわかった。

以上より、岸壁係留船舶に津波が来襲した場合の安全性評価を行う場合には、岸壁と船側の間に相対速度を持つ操縦性分野の側壁影響をそのまま適用することは困難であることが示された。

4.5 模型船の取り付け角度の影響

曳航岸壁は流れに対して平行に配置したまま、模型船に斜航試験と同じ流入角(± 5 , ± 10 度)を与えた実験を行った。模型位置は曳航岸壁の中央である。ただし、模型船に流入角を持たせると、船首もしくは船尾部が曳航岸壁と接触するため、曳航岸壁と模型船甲板面との最接近部に 20[mm]以上の距離を持たせた実験を行った。そのため、船首船尾部がオーバーハングして岸壁側に飛び出すような極端な状態の実験は行っていない。模型船を上方から見て右回りに 10 度の流入角をつけた場合の結果を Fig. 17 に示す。

これまでの解析結果と大きく異なり、流入角をつけた状態では前進・後進方向の違いにより、岸壁と船体の相互干渉に強い非対称性が生じる傾向がみられる。特に前後力と回頭モーメントにおいては岸壁との距離の違いによる傾向も、その大きさにおいても強い非対称性として表れている。解析結果をみると、流入角が無い場合の解析結果と比べて、距離による顕著な違いは見られない。これは、流入角がついた状態では曳航岸壁と船側との距離が一定以上離れていることが原因であろう。したがって、流入角がある状態では、距離にはあまり依存しないことがわかる。特に船首側が岸壁に接近している後進方向のモーメントの実験結果は、斜航試験の結果と同等であることがわかる。

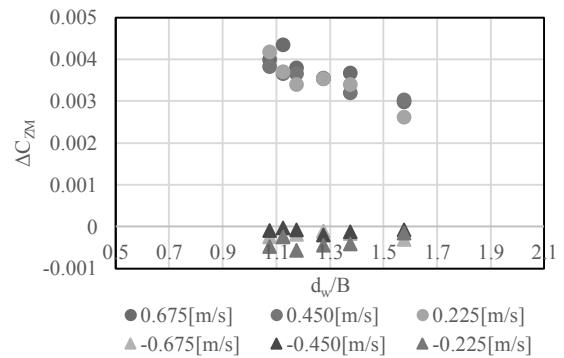
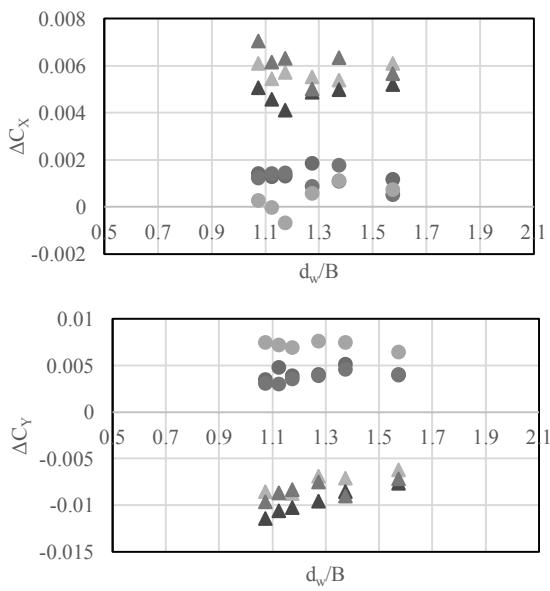


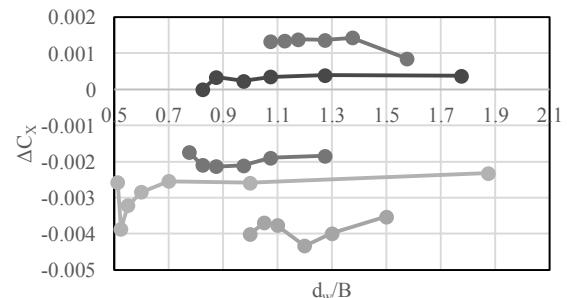
Fig. 17 Measured hydrodynamic force at mount angle of ship of +10 degrees.

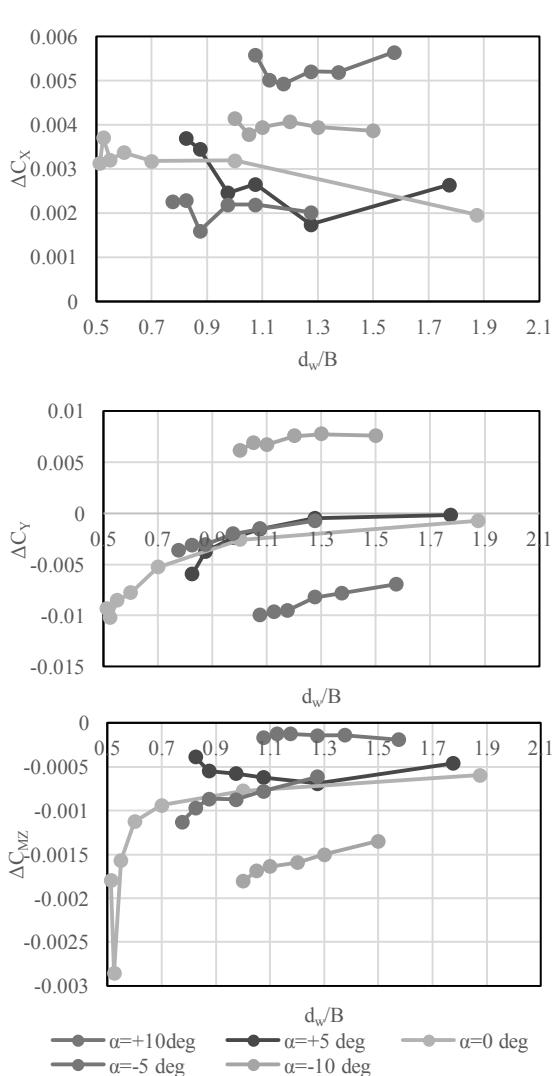
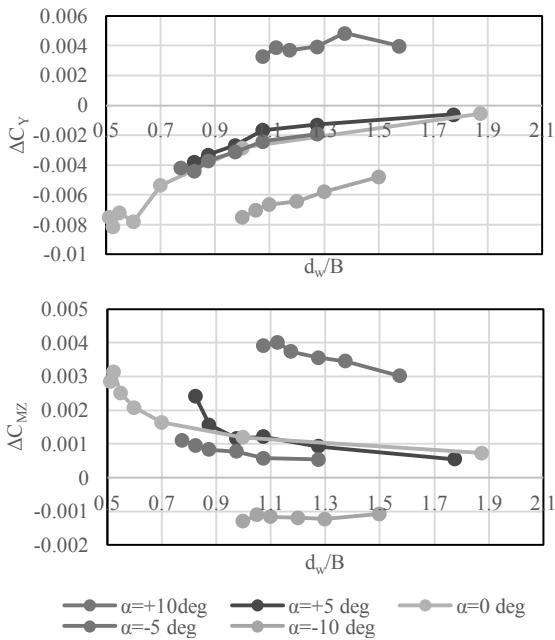
他の流入角で行った解析結果をまとめて Fig. 18, Fig. 19 に示す。これらのグラフは、各流入角度において、速度 0.45[m/s] と 0.675[m/s] の二つの平均値を用いている。

Fig. 18 の前進時の解析結果をみると、横力と回頭モーメントについて ± 5 度での解析結果が 0 度での解析結果の線上に乗っていることから、岸壁との距離への依存は 0 度とほぼ同じであり、斜航試験結果に対して線形な結果になることがわかる。次に ± 10 度の結果は 0 度の結果から大きく離れていることから、 ± 5 度以上になると岸壁との距離だけで議論できないことがわかる。

次に Fig. 19 の後進時の結果をみると、前進方向の結果と同様に横力と回頭モーメントは関数近似しやすいようであるが、前後力については複雑な変化となっている。

以上のことから、係留索によって運動がかなり拘束されている係留船舶が津波の襲来を受ける場合の安全性評価を行う場合は、斜航角が 5 度程度までの結果と、流入角 0 度での岸壁影響の距離に対する変化の足し合わせによって、ある程度表現できることがわかった。ただし、係留状態からの漂流シミュレーションを行うような場合には、 ± 10 度の結果を踏まえると複雑な表現方法が必要であることがわかった。





5. 考察と提案

5.1 岸壁影響の大きさの目安

前章では、岸壁係留船舶に津波を想定した強い水平流れが作用した場合の流体力について、トータルの力ではなく、岸壁が無い状態での実験結果を差し引いた岸壁の存在による影響を議論していた。しかし、実用的な観点からみると、岸壁影響が一般的な岸壁無しでの斜航試験の結果に対してどの程度の割合であるかを知ることはひとつの目安となる。そこで、Fig. 18, Fig. 19 に示した 0.45[m/s] と 0.675[m/s] の平均値について、各流入角における絶対値の最大値を抜き出し、Fig. 10 の斜航試験の結果に対する割合を力の方向ごとに求めた。その結果を Table 2, 3 に示す。限られた計測範囲内の最大値(主には最接付近での値)の比較ではあるが、斜航流体力に対して最大で 60% 超に及ぶことが分かる。したがって、岸壁係留船舶の津波来襲時の安全性評価を行う際には、本論文で述べた岸壁影響の考慮が必要であると考えられる。

Table 2 Percentage of quay wall effect to drift effect (Forward).

	X-direction [%]	Y-direction [%]	Around Z [%]
0[deg]	41.4	-	-
+5[deg]	3.3	48.8	47.3
+10[deg]	9.1	24.9	43.5
-5[deg]	18.1	<u>56.2</u>	21.8
-10[deg]	27.5	38.6	14.0

Table 3 Percentage of quay wall effect to drift effect (Backward).

	X-direction [%]	Y-direction [%]	Around Z [%]
0[deg]	30.1	-	-
+5[deg]	32.5	<u>63.4</u>	28.3
+10[deg]	40.2	52.8	5.9
-5[deg]	20.2	38.5	46.1
-10[deg]	29.6	40.9	56.5

5.2 係留強化への利用方法

係留に及ぼす津波の影響を考慮する場合、港湾ごとに想定される津波が異なるため、津波に対する汎用的な係留強化策を示すことは難しい。津波を考慮しない場合、岸壁に大型船舶を係留する際には、港湾内の風、波浪、潮流等を複合的に考慮して係留索の配置等が決められる。しかし、本研究が対象としている岸壁係留は、防波堤内であるため波浪の影響は小さく、潮汐の影響も小さいと考えられる。この場合、岸壁係留船舶の安全性は、主として風の影響を考慮するのが妥当と考えられる。そこで、前章までに示した岸壁と並行に係留された状態での模型実験結果と風の影響を対比することで、実用的な係留強化の指針とすることを試みる。

風の影響の推定に際しては、藤原ら²⁰⁾によって導かれた風圧力係数を用いる。ただし、本研究の対象船であるコンテナ船は藤原らの実験に用いられた船型と類似性が高く、推定式を用いずにTable 4に示した満載コンテナ船の実験結果を直接用いた。

次に、風圧力と岸壁係留船舶が津波から受ける流体力が釣り合う点を調べた。ここでは、力の大きさのみに着目しており、方向については無視している。特にy方向については津波によって生じる横力が岸壁に押し付ける方向となっているため安全側の評価となる。Fig. 20は、実験結果および風圧力の有次元化を行い、各津波速度に対応する風速を求めて近似曲線を描いたものである。前後方向については、津波の流速が4.5[m/s]であった場合、風速に換算すると約35[m/s]相当となる。ただし、岸壁のペンドル等との摩擦力を考慮していないため過大評価の傾向があろう。横方向については、津波と岸壁による影響は岸壁に押し付ける方向となるため、仮に津波の流速が4.5[m/s]であった場合には約15[m/s]の風が離岸する方向に吹かなければ、船が離岸することはない。回頭モーメントについては、津波流速4.5[m/s]の場合、約22[m/s]の風が斜め船尾側から吹いたときと同じ力となる。

以上のことから、流速が4.5[m/s]の津波を想定した場合、風速22[m/s]の風に耐えるだけの係留力を保持していれば、津波来襲時にも係留破断により漂流することはないといえる。ただし、津波来時に港湾内に風が吹いている場合は両者が重畳するため、Fig. 18から津波の最大流速を入力値として求まる相当風速に対する港湾で見込まれる最大風速を加えた値の風速に耐えるだけの係留が必要となる。

Table 4 Maximum wind force coefficient²⁰⁾

	X-direction	Y-direction	Around Z
Incident angle of maximum wind force [deg]	160	90	130
Wind force coeff.	1.05	0.94	0.125

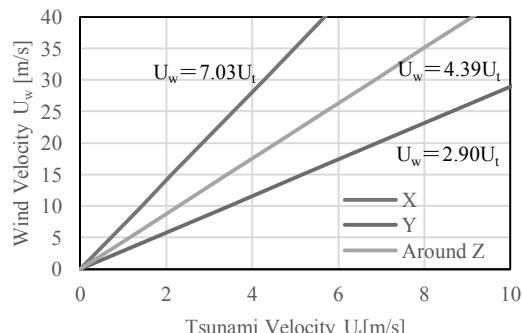


Fig. 20 Relation between tsunami and wind forces with respect to each velocity.

5.3 横傾斜への影響

ここでは、津波により生じる横傾斜について考える。岸壁係留船舶に対して前後から津波を受けた場合、横方向の流体力が生じるが、この着力点は水面下にあり、重心位置は一般的に水面上にあるため、横傾斜モーメントが発生する。また、横方向の力は係留索に作用する張力によって相殺されているものと仮定すると、係留による横傾斜も考慮する必要がある。これらの和として求めた横傾斜モーメントに釣り合うだけの復原力が生じる横傾斜角を求めることで、津波によって岸壁係留船舶に生じる横傾斜を議論することができる。

簡単のため、流体力の着力点を喫水の半分の位置とし、係留索の着力点を上甲板高さとする。そのうえで、実験を行った条件の中で最大の横傾斜モーメントが生じる条件を抽出し、復原力曲線との交差点から釣り合い角を求めた。なお、メタセンタ高さには設計値である1.965[m]を使用した。

Table 5 Result of roll angle

Attack angle [deg]	-10	-5	5	10
d_w/B	1.3	1.275	1.775	1.375
Flow velocity [m/s]	-4.5	-4.5	4.5	4.5
Heel angle [deg]	14.3	4.8	4.0	12.8

検討結果をTable 5に示す。±10度の結果については、岸壁からかなり離れた状態であるにも関わらず、15度付近まで横傾斜することがわかる。しかし、復原力としては十分に余裕がある状態であり、対象としたコンテナ船については、津波来時に復原性上の危険は生じないようである。

6. 結 言

津波来時の岸壁係留船舶の安全性評価を目的として、曳航岸壁と模型船を同時に曳航する水槽試験を実施することにより、津波が岸壁係留中の船舶に生じさせる流体力を実験的に求めた。その結果を以下にまとめる。

- 曳航岸壁と模型船を平行に配置した曳航実験では、岸壁に近いほど大きな力が作用する。その力の向きは、横力は船を岸壁に押し付ける方向であり、回頭モーメントは流れの流入方向側が離岸する方向である。
- 固定岸壁を用いた実験結果と曳航岸壁を用いた実験結果は一致せず、特に回頭モーメントの評価に大きな差が生じる。
- 岸壁に対して流入角を持たせて模型船を取り付けた場合の流体力が得られ、その横力と回頭モーメントは定式化が可能と思われる変化であった。
- 斜航試験で得られる斜航流体力に対して、岸壁の影響は最大で約60%であり、安全性評価および動的なシミュ

レーションの際に無視できない大きさである。

- ・ 津波により生じる流体力について、相当風速への換算式を導くことにより、港湾に応じた係留強化策を議論することが可能となった。
- ・ 津波により生じる横傾斜は最大で 15 度未満であり、復原性に関して危険は生じない。

本研究で行った実験は、コンテナ船に対して得られた結果であり、同じく岸壁係留を要するばら積み貨物船についても同様の検討が望まれる。また、実験上の制約から、水深影響については未検討であり、今後は数値流体力学（CFD）を用いた数値実験による検討が望まれる。また、今回の研究成果に基づき、係留系（係留索やアンカー）を含めた動的なシミュレーションや水位変動の影響評価などを通じて、さらに高度な津波対策の検討を行う予定である。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 15K14263 の助成及び日本科学協会の笹川科学研究助成による助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省港湾局海岸・防災課：港湾における地震・津波に対する取り組みについて、平成 24 年 5 月。
- 2) 日本海難防止協会：3.11 巨大地震と大津波の教訓を伝える、平成 24 年 3 月。
- 3) 国土交通省 海事局：船舶運航事業者における津波避難マニュアル作成の手引き、津波発生時の船舶避難態勢の改善に向けた検討会、平成 26 年 3 月。
- 4) 国土交通省海事局：旅客船事業における津波避難マニュアルの作成の手引き、津波発生時における旅客避難マニュアル検討会、平成 25 年 3 月。
- 5) 国土交通省近畿運輸局：船舶運航事業者における津波避難マニュアルの作成の手引き、平成 26 年 5 月。
- 6) 国土交通省関東地方整備局・茨城県土木部：鹿島港における東日本大震災の復旧・復興方針、平成 23 年 8 月。
- 7) 神戸海難防止研究会：大型船の津波災害からの減災に関する調査研究、平成 27 年 3 月。
- 8) 増田光弘、庄司邦昭、南清和、増田光一：係留船舶の津波中挙動シミュレーションに対する 3 次元 MPS 法の適用、日本航海学会論文集、第 125 号、175-182, 2011.
- 9) 増田光弘、南清和、増田光一：津波来襲時における岸壁に係留された船舶の防災・減災対策に関する研究(その 1)、日本航海学会論文集、第 128 号、pp.29-37, 2013.
- 10) 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係留 VLCC の挙動再現について、日本航海学会論文集、第 127 号、pp.57-68, 2012.
- 11) 榊原繁樹、阿部郁男、津金正典、久保雅義：港内係留船舶のかく坐による津波対策に関する基礎的研究、日本航海学会論文集、第 128 号、pp.251-260, 2013.
- 12) 久保雅義、斎藤勝彦、榎原繁樹：岸壁全面係留船の船体運動へのストリップ法の拡張、海岸工学講演会論文集、Vol.35, pp.682-686, 1988.
- 13) Norrbin, N. H.: Bank Effects on a Ship Moving Through a Short Dredged Channel, Proceedings of the 10th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, pp. 71-88, 1974.
- 14) 井関俊夫、川村大輔：側壁影響下の操船限界に関する実験的研究、日本航海学会論文集、第 128 号、pp.161-166, 2013.
- 15) Satake, K., Fujii, Y., Harada, T. and Namegaya Y. :Time and Space Distribution of Coseismic Slip of the 2011 Tohoku Earthquake as Inferred from Tsunami Waveform Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.103 No.2B, pp.1473-1492, 2013.
- 16) Baba, T., Takahashi, N., Kaneda, Y. et al. :Parallel Implementation of Dispersive Tsunami Wave Modeling with a Nesting Algorithm for the 2011 Tohoku Tsunami, Pure Appl. Geophys. , Vol. 172, pp.3455-3472 3455, 2015
- 17) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告) 津波断層モデル編、平成 24 年 8 月。
- 18) M. Levadou, R. vant Veer : Parametric Roll and Ship Design, Proceedings of the 9th International Conference of Ships and Ocean Vehicles, pp.191-206, 2016.
- 19) Yoneda, S., Hashimoto, H., Kobayashi, E., : An experimental study on the wall effect on ships in emergency unberthing against Tsunamis, Transactions of Navigation, submitted.
- 20) 藤原敏文、上野道雄、二村正：船体に働く風圧力の推定、日本造船学会論文集、Vol.183, pp.77-90, 1998.