

# 港湾内に進行する津波の推定と 係留船舶への影響評価の試み

## PRESUMPTION OF TSUNAMI TRAVELING IN HARBORS AND INFLUENCE ON MOORED SHIPS TO QUAY WALLS

中屋行雄<sup>1</sup>・津田宗男<sup>2</sup>・青野利夫<sup>3</sup>・杉浦秀之<sup>4</sup>・本多将人<sup>4</sup>

Yukio NAKAYA, Muneco TSUDA, Toshio AONO, Hideyuki SUGIURA, Masato HONDA

<sup>1</sup>正会員 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

<sup>2</sup>正会員 工修 東亜建設工業株式会社 西日本設計センター (〒550-0004 大阪市西区鞠本町一丁目5番15号)

<sup>3</sup>正会員 工博 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

<sup>4</sup>正会員 東亜建設工業株式会社 西日本設計センター (〒550-0004 大阪市西区鞠本町一丁目5番15号)

In this paper, the characteristics of the tsunami due to Nankaido earthquake and moored ship motions were investigated numerically. Tsunami simulation was carried out by using shallow water wave theory and moored ship motions were evaluated by strip method. The traveling time of the tsunami that from hypocenter to Kobe port was about 2 hours, and tsunami current was parallel to normal direction of quay walls. The moored ship was oscillated several meters to surge and sway direction by incident of tsunami. Reaction force of fenders where located near stem and stern were increased by yaw. Such influence of the tsunami on moored ships to quay walls and countermeasures against tsunami disasters were estimated.

*Key Words: Tsunami, Nankaido earthquake, Numerical simulation, Moored ship motions*

### 1. はじめに

東南海・南海地震は、今世紀前半に高い確率で発生することが予測されており、東海から四国にかけての沖合にあるプレート境界（南海トラフ）でマグニチュード8クラスの巨大地震が発生するといわれている。同トラフの大地震は、100～150年間隔で発生し、激震に加えて大津波を引起し、沿岸各地に甚大な被害を与えてきた。大阪湾奥の港湾エリアに於いても2m前後の水位変動が想定されており<sup>1,2)</sup>、被害規模の推定と適切な対策が必要である。

津波による係留船舶への影響は、船舶規模によっても異なるが、山本ほか<sup>3)</sup>、明田ほか<sup>4)</sup>は、漁港内の漁船被害について整理し、地震発生から津波到達までの間に港外へ避難すれば、漁船被災はほとんどないと報告している。しかし、神戸港をはじめとする阪神エリアの大型港湾では、常時多数の船舶が係留および荷役を行っており、短時間で港内全ての船舶が港外へ避難することは難しい。特に、大型船舶は、操船上入り船状態で着岸し荷役を行うことが一般的であるため、津波の来襲が予想された場合、タグボートなど補助船の配備、係留解除、回頭を行い短時間で港外へ避難することは容易ではない。従って、大型船舶の場合、係留された状態で津波が来襲することを想定しておく必要がある。また、大型船舶は、荷役中において種々の荷役機械と近接して作業を実施しており、地震動によって荷役機械が故障や停電などの緊

急停止状態となった場合、船舶の挙動によって荷役機械へも接触、損傷などの影響を及ぼすことが考えられる。

本検討は、阪神～播磨エリアを評価対象地点に選定し、南海道地震が発生した場合における津波の伝播状況をシミュレーションして、大型船舶が係留されている岸壁付近の水位変動や流速場を推定した。そして、津波による水位変動推定結果をもとに係留船舶動揺シミュレーションを実施し、船舶の挙動推定および係留設備の安全性評価を試みたものである。

### 2. 津波伝播シミュレーション

#### (1) 解析手法

津波の数値解析は、後藤による非線形長波理論（浅水波理論）を用いて実施した<sup>5)</sup>。津波伝播の基礎方程式として、連続式とNavier-Stokesの方程式を水深方向に積分した以下に示す式を用いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{M^2}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{MN}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f}{D^2} MQ = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{MN}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{N^2}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{f}{D^2} NQ = 0 \quad (3)$$

ここで、 $(x,y)$ は静水面での空間座標、 $t$ は時間、 $\eta$ は水位変動、 $h$ は静水深、 $D$ は $D=h+\eta$ で表される全水深、 $g$ は重力加速度、 $f$ は運動量損失係数および底面摩擦の合算係数、 $(M,N)$ は各 $(x,y)$ 方向の線流量 $Q=(M^2+N^2)^{1/2}$ である。数値解析は、式(1)から式(3)を差分化しStaggered Leap-frog法によって実施した。

津波の初期条件は、地震断層モデルからMansinha and Smylieの方法<sup>6)</sup>で計算した海底地盤変動量の鉛直成分を海面上の水位変動として与える方法によって設定した。沖合の計算境界は、放射条件を与えることにより自由透過境界とし、陸地と海の境界は、津波は完全反射すると仮定している。

計算格子は、後藤・小川の方法に準拠し、外洋領域を3,600mとし、1,800m, 600m, 200m, 66.6mと格子間隔を段階的に狭くするネスティング手法を用いた<sup>7)</sup>。今回の解析では、陸上遡上計算を実施しないため、計算格子サイズは若干大きくとっている。

### (2) 初期水位条件

地震断層パラメータは、相田による昭和南海地震の断層パラメータを基本としたモデルを用い<sup>8)</sup>、海上保安庁公表の神戸地区における津波防災情報図に記載ある結果と整合性を図りながらパラメータのキャリブレーションを行っている。

図-1は、断層モデルから計算される初期水位の分布をである。図示した水位の単位はmである。

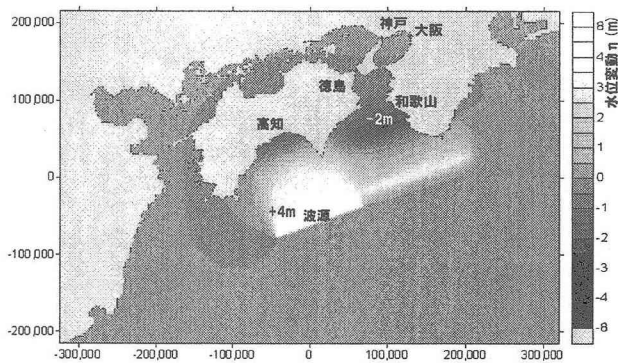


図-1 断層モデルから計算される初期水位分布

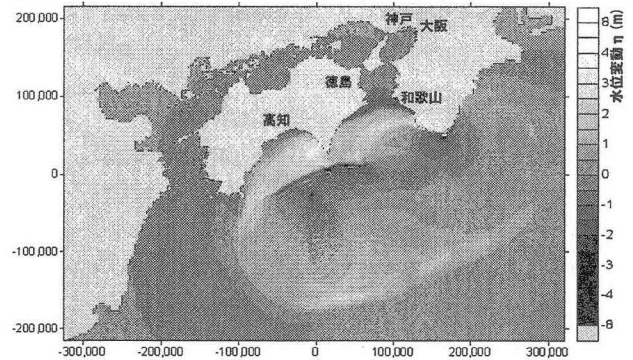
### (3) シミュレーション結果

南海沖を中心とした瀬戸内海を含む計算全体領域における津波の水位変動分布を図-2に示す。地震発生後20分経過で津波が紀伊水道に進入を開始し、約1時間後に友ヶ島水道および鳴門海峡を通過し、約2時間後には大阪湾奥の神戸地区へ到達していることがわかる。

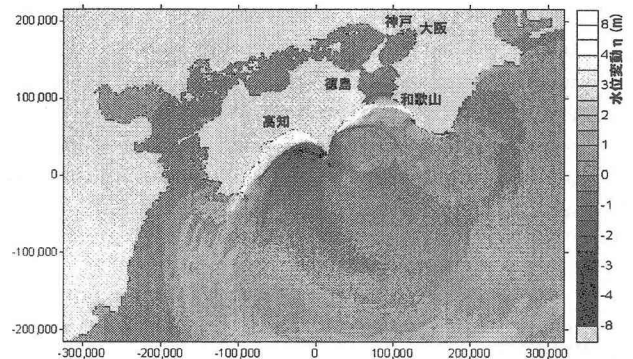
図-3aは、地震発生から130分経過後における大阪湾周辺の水位変動と流速分布を示したものである。地震発生後120分経過して大阪湾奥に到達した津波の反射波が、神戸地区へ西向き強い流れとして来襲している。

また、図左側の播磨地区へは、友ヶ島水道、明石海峡と鳴門海峡の2方向から進入した津波が重なり合うことで水位が上昇している。

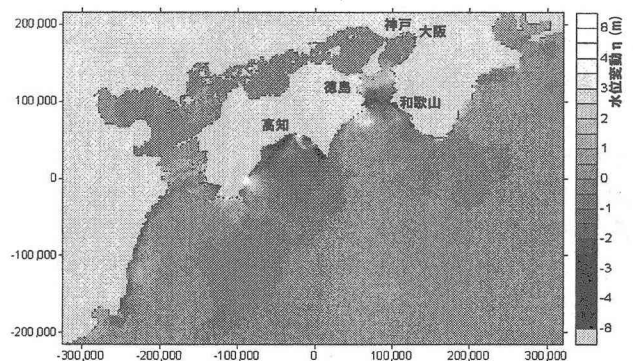
図-3bは、流速の分布をベクトル表示したものであり、大阪湾奥や神戸港でも1m/s以上(約2knot以上)となる水域が確認された。流速の時間的変化は、津波による水塊の引き押しとともに港湾地形によって変化し、港内であっても流速が大きくなる場合がある。



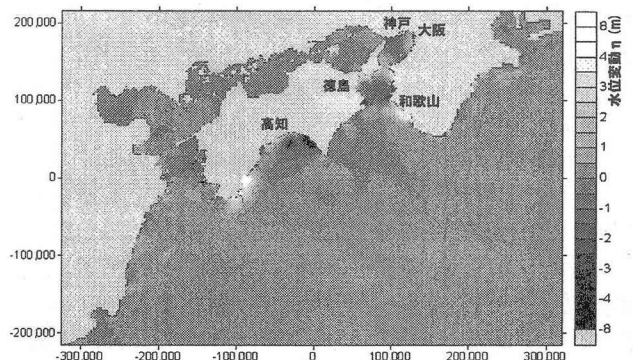
a. 地震発生後10分経過



b. 地震発生後20分経過

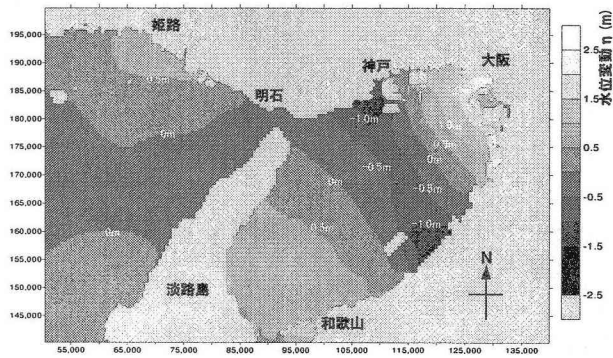


c. 地震発生後60分経過

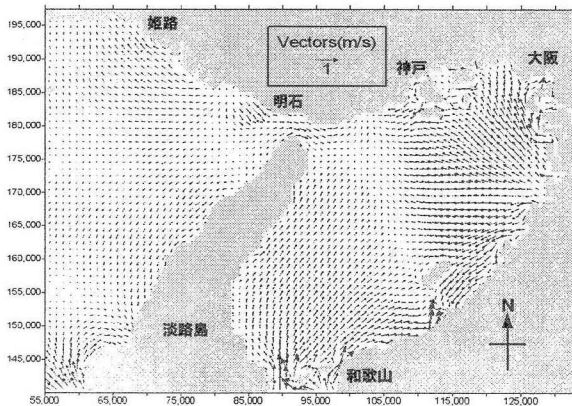


d. 地震発生後120分経過

図-2 地震発生後の水位変動分布\_解析全領域



a. 地震発生後130分経過時の大阪湾周辺水位変動



b. 地震発生後130分経過時の大阪湾周辺流速分布

図-3 大阪湾周辺の水位変動と流速分布

図-4は、神戸港周辺の地震発生後140分の流速分布である。この時点では、津波の第2波が西から来襲し、東側から第1波の反射波が来襲してきており、水位上昇を起こしている。複雑な港湾地形の中でも、水域幅が狭くなる箇所は、流速が大きくなる傾向にある。

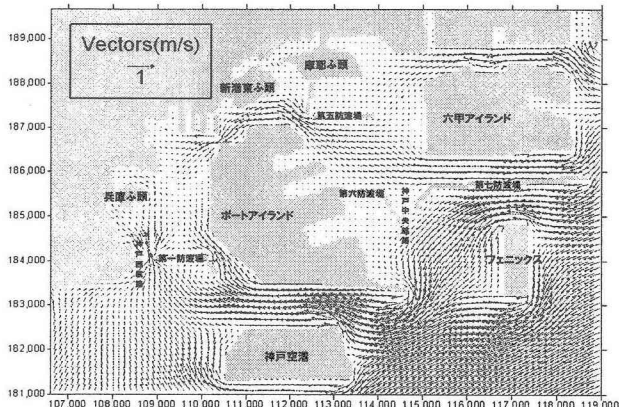


図-4 神戸港周辺の流速分布\_地震発生後140分

図-5は、解析データの分析対象に選定した地点を示している。この場所は、大型船舶による荷役が常時実施されている神戸港奥の荷役岸壁である。

図-6は、東西および南北方向の流速変化をプロットして波の卓越方向を示したものである。3地点ともに岸壁に沿う方向が卓越し、水塊の通り道となる岸壁前面で

は、流速0.5m/s程度の流れが確認された。なお、ここで示す流速は、解析格子1メッシュ(格子間隔66.6m)における断面平均流速である。



図-5 神戸港奥のデータ抽出箇所(格子間隔66.6m)

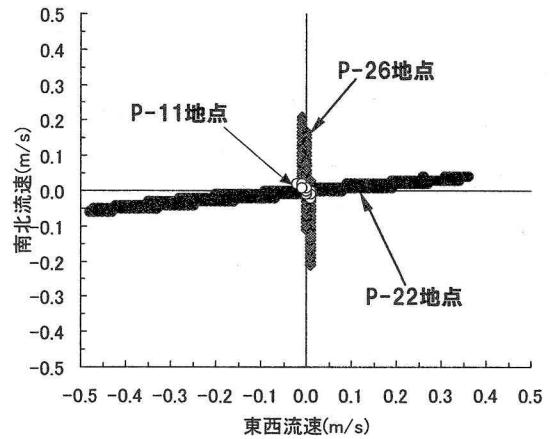


図-6 波の主方向

図-7は、P-11およびP-22地点における水位変動と岸壁法線方向に対する卓越流向の時系列変化を示したものである。神戸港奥における津波の第1波は引き波であり、地震発生から約2時間半後に水位が最高位に到達する。津波の水位変動は、両地点ともに両振幅値で約1.8mとなり、その周期は約1時間である。流向は、流速の小さいP-11地点ではバラツキが見られるものの、流速の大きいP-22地点では、岸壁法線に平行な流向が卓越し、押し波および引き波毎に流れの向きが180度反転する。

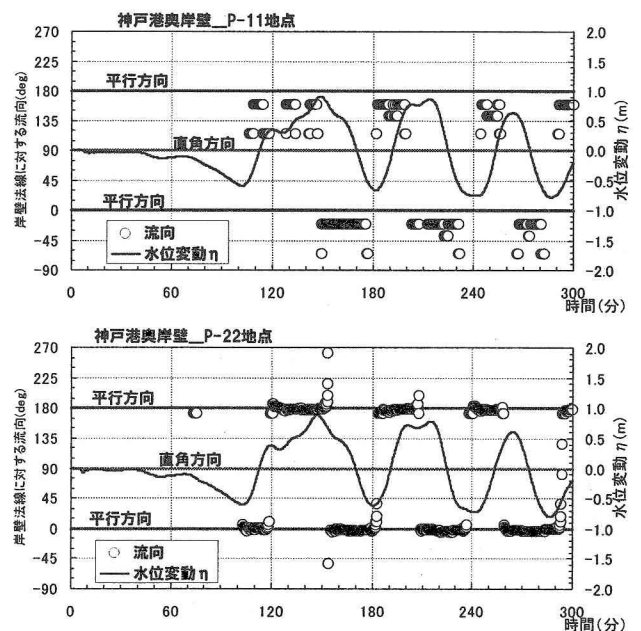


図-7 水位変動と岸壁法線に対する卓越流向

### 3. 係留船舶動揺シミュレーション

#### (1) 解析条件

津波の水位変動による係留船舶への影響を評価するために動揺シミュレーションを実施した。解析手法は、通常船舶の動揺計算で用いられている2次元流体力を2次元特異点分布法によって求めるストリップ法である。

表-1は、検討対象船舶の主要目である。各船舶は、阪神～播磨地区における船舶係留状況のヒアリングを行い、大型船舶として一般的な7万トン級（パナマックスサイズ）および20万トン級（ケープサイズ）を選定した。

表-1 検討対象船舶の主要目

要目	7万トン級	20万トン級
船種	BULK_CARRIER (入船時)	
全長	Loa 225.00 m	320.00 m
垂線間長	Lpp 217.90 m	310.00 m
船幅	B 32.26 m	53.00 m
型深	D 19.30 m	24.80 m
吃水	d 11.81 m	16.50 m
排水量	Disp. 71,447 MT	200,999 MT
重心高	KG 9.20 m	10.00 m
Roll環動半径	$K_{\phi}$ 11.05 m	21.20 m
Pitch環動半径	$K_{\theta}$ 69.0 m	93.00 m
Yaw環動半径	$K_{\psi}$ 69.0 m	93.00 m
係留場所水深	h 14.7 m	19.0 m

図-8は、動揺解析を実施した船舶の各係留システム図である。右、左舷着の違いはあるが、いずれも入り船の着岸状態を想定したものである。また、外力作用方向は、津波解析結果より岸壁法線に対して平行方向が卓越することから、図中矢印で示した船尾方向を選定した。係留系は、バルクキャリア船の一般的な荷役時を想定しており、ヘッドライン4本、スターンライン4本、スプリングライン4本（船首尾各側2本ずつ）の12点係留である。防舷材は、船体の平行ボディに5カ所接舷している状態を想定している。

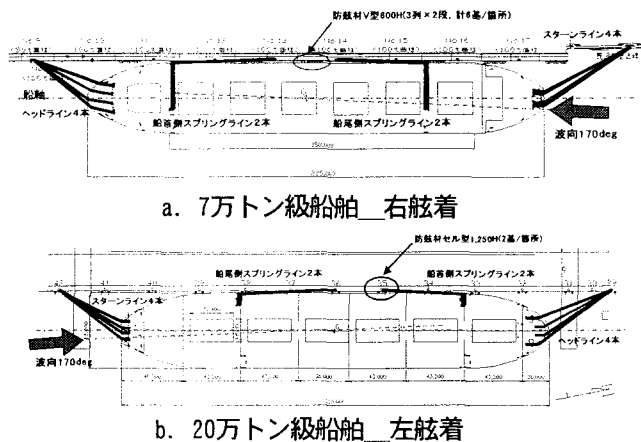
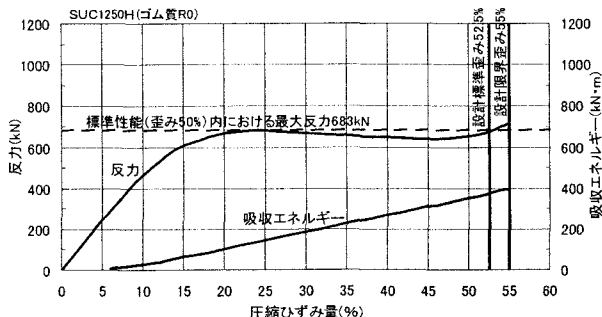
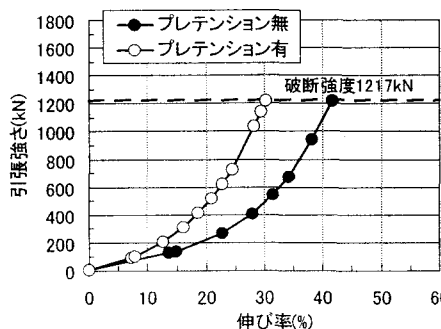


図-8 係留システム図

図-9は、20万トン級の係留系で考慮した係留索および防舷材の特性（新規品のメーカー提示値）を示したものである。防舷材は、湾内の荷役岸壁で一般的に使用されている定反力型とし、係留索は、バルクキャリア船の対象船舶クラスに一般的に使用されているナイロン製のイトロープを選定した。計算には、繰返し荷重負荷後（プレテンション有）の係留索特性を使用している。



a. 定反力型防舷材（セル型）の変位復元特性曲線



b. ナイロン索（8つ打）φ80mmの特性曲線

図-9 係留索および防舷材の特性

本検討では、津波による水位変動および流れの場と係留船舶の応答を推定する目的で、外力条件として単一方向の規則波を作用させた。規則波の諸元は、津波解析結果を反映させて、波高2.0m、周期3,600秒と設定した。

時系列シミュレーションに用いる流体力は、津波水位変動の周期3,600秒で代表させた値を使用している。図-10は、Sway方向の付加質量と造波減衰力を示したものである。周期が長くなるとともに、付加質量は増大し、造波減衰力はゼロへ近づく。なお、Surge方向は、付加質量係数1.1と設定しており、造波減衰力はゼロである。

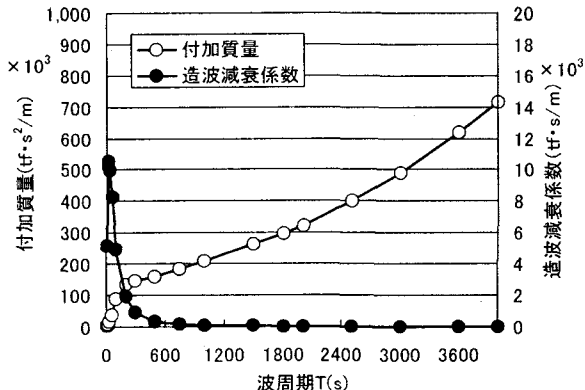


図-10 Sway方向流体力（20万トン級）

(2) シミュレーション結果

図-11は、20万トン級の入射波向 $\chi=170$ 度から水位変動を作用させた場合の時系列動揺波形である。各運動における符号の定義は、図-12に示したとおりである。

Heaveは、水位変動と同位相かつ同振幅となる。Surgeは、水位変動と同じ周期で位相差 $-90$ 度の $\pm 3$ m程度の振動が発生し、周期約250秒で $\pm 2 \sim 4$ m程度の係留系による固有振動成分と重なり合った挙動を示した。Yawは、水位変動と同じ周期で $+90$ 度の位相差をもって約 $\pm 1$ 度回転している。Swayは、Yawとの連成運動により変位が発生し、防舷材反力をうけて、離岸方向へ約2m動揺することが確認された。RollおよびPitchについては、その挙動が極めて小さいため、記載を省略している。なお、20万トン級と比して排水量が小さい7万トン級における時系列動揺の傾向も上記と同様である。

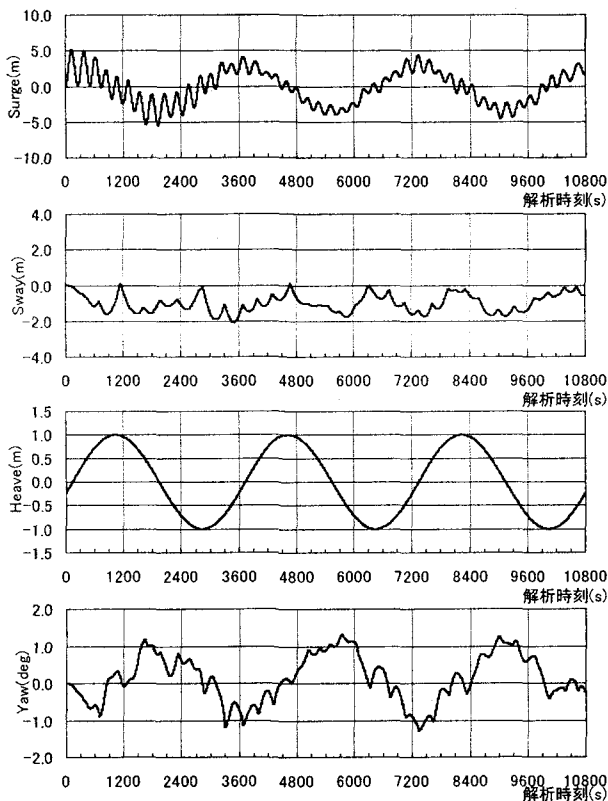


図-11 動揺時系列波形\_20万トン級\_ $\chi=170$ 度

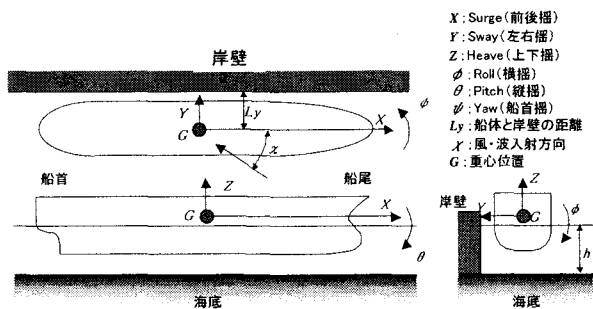


図-12 各動揺モードの定義\_左舷着の場合

図-13は、上記で記述したケースの係留索張力と防舷材反力の時系列変化として負荷の大きい箇所を示した。

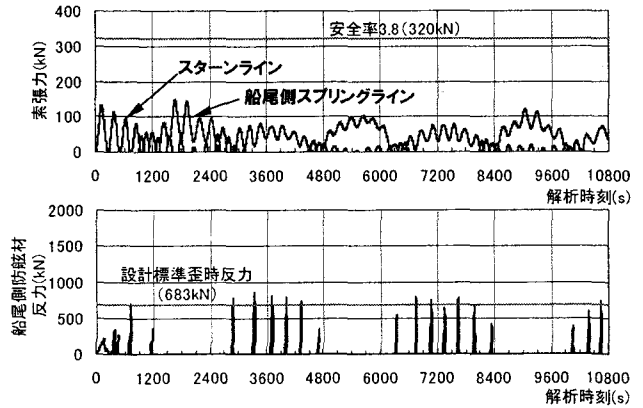


図-13 係留索張力および防舷材反力の時系列波形

表-2は、船体動揺量、係留索張力、および防舷材反力の最大値を示している。係留索および防舷材は、係留系の中で最大となる箇所の数値を表記しており、各数値の下段に最大値出現箇所を記している。表には、外力方向を $\chi=150$ 度とした結果も併記している。

表-2 動揺解析結果最大値のまとめ

波向	項目	7万トン級	20万トン級
170度	SURGE	+2.66, -2.26m	+5.19, -5.46m
	SWAY	-0.96m(離岸方向)	-2.09m(離岸方向)
	YAW	+0.93, -0.75deg	+1.32, -1.29deg
	係留索張力	62kN(13.1*) 船尾側スプリングライン	169kN(7.2*) 船首側スプリングライン
170度	防舷材反力	368kN(3.0**) 最船尾側防舷材	842kN(0.8**) 最船尾側防舷材
	150度	SURGE	+2.34, -1.57m
SWAY		-1.05m(離岸方向)	-2.30m(離岸方向)
YAW		+0.80, -0.61deg	+1.55, -1.05deg
係留索張力		52kN(15.5*) 船首側スプリングライン	149kN(8.2*) 船首側スプリングライン
150度	防舷材反力	296kN(3.7**) 最船首側防舷材	807kN(0.8**) 最船尾側防舷材

注釈) \*: 係留索の破断荷重に対する安全率

\*\* : 防舷材標準性能歪時の反力に対する安全率

7万トン級と比較して20万トン級の動揺量および係留設備への負荷は、全て大きくなる。これは、船舶排水量の大きい方が外力の受圧面積が大きくなること、そして、津波の周期帯3,600秒では、船舶の造波減衰効果がないためである。

波向が船体横方向へ少し変化した場合、Surgeの動揺減少量に対し、Swayの動揺に大きな増加は確認されなかった。これは、算定されたSway方向の動揺量は、Yawの連成運動によること、および主にYawに伴い発生する防舷材の反力を受けて発生した動揺量であり、船横方向外力に影響された動きではないと考えられる。また、本検討では岸壁による反射波を考慮しており、その反射率

を1.0と設定している。このため、Sway方向（船体横方向、今回の解析座標系では $\chi=90$ 度）外力は、入射波による波強制力と反射波による波強制力に位相差がなく、また船体重心方向に相互に向合う方向で作用するため、相殺されて殆ど外力が発生しないこともSway動揺量に大きな変化がなかった理由である。

各係留索は、張力最大時においても破断荷重に対する安全率は高い。これは、図-13に示した係留索張力の時系列変化からもわかるように、モデル化した係留系がSurge方向外力に対して前後均等かつ有効に作用し、バランスよく外力を吸収しているからである。

防舷材反力は、解析ケース全体を通じて、船首尾両端部位置の防舷材において大きくなる事が確認された。これは、Yawの影響であり、通常波浪時の動揺と比較してゆっくりとした動きの中であっても、船舶の付加質量が大きいため作用外力も大きくなると考えられる。

#### 4. まとめ

本検討によって得られた成果を以下に示す。

##### (1) 津波の来襲特性

- ① 南海道地震を想定した波源による津波シミュレーションの結果、多数の大型船舶が常時荷役作業を実施している大阪湾奥、神戸湾奥へ第1波が到達するのは約2時間後である。
- ② 神戸湾奥における津波の水位変動は、両振幅値で最大約1.8mとなり、周期は3,600秒である。
- ③ 流速は、防波堤、人工島など港湾形状に大きく左右され、津波進行方向に対して水域の幅が小さい箇所は、相対的に流速が大きくなる。湾奥の岸壁前面においても0.5m/s（約1knot）の流速が推定された。
- ④ 大型船舶が係留される岸壁近傍の流向は、岸壁法線に平行な方向が卓越することが明らかとなった。

##### (2) 津波による係留船舶への影響

- ① 岸壁係留された大型船舶に津波が来襲した場合、Surgeは、水位変動による振動と係留系の固有周期（7万トン級：約140秒、20万トン級：約250秒）による振動が重なって片振幅値で約2.5m（7万トン級）～5m（20万トン級）動揺する。また、Swayは離岸方向へ1m～2m程度引き離される結果となった。従って、大型船舶の荷役が実施される箇所では、隣接船舶との間隔を適切に保つ係留配置計画が必要である。また、荷役機械と大型船舶が近接した状態で、荷役機械が非常停止した場合などは、津波来襲までに荷役機械を船舶から離すための対策をとることが望ましい。
- ② Yawの影響によって、船舶と接する防舷材の中で船首尾両側端部に位置する防舷材への負荷が大きくなる可能性がある。この場合は、ヘッドラインおよびスターンラインを複数の係留柱へ分散配置するなどの係留システム変更が望ましい。

##### (3) 今後の課題

- ① 今回は、従来使用されている船舶動揺解析手法を用いて検討を実施した。今後は、水理模型実験により現象の再現性を確認し、津波特有の外力項を再現できるシミュレーション手法を構築する予定である。
- ② 津波には、数分から1分程度の成分波が含まれ、係留船舶の長周期運動と共振する可能性も指摘されている<sup>9)</sup>が、今回の動揺シミュレーションでは、周期数分程度の波浪成分は考慮されていない。周期数分程度の長周期波に対しては、SurgeやSwayが大きくなり、船舶係留や荷役作業に障害がでることも明らかになっている<sup>10)</sup>ため、今後はこの点も踏まえた上で検討を実施する必要がある。
- ③ 今回は、湾奥の津波波高が小さい地点における検討であるが、沖合人工島の岸壁や太平洋沿岸の港湾では、来襲する津波が大きくなる。従って、様々な港湾施設の安全性について検討しておく必要がある。
- ④ 今回は、岸壁に係留された船舶を対象としたため、Sway方向の波力は殆ど発生しない条件であった。また、津波解析結果によって岸壁前面ではSway方向の流れがないことを確認した。しかし、Sway方向に卓越した流れが発生する船舶係留地点（ドルフィン形式の固定式バースなど）では、津波周期帯における船舶の流体力係数の特徴を考慮すると、大きなSway動揺量が発生し、防舷材や係留索に大きな負荷が作用することが考えられる。この点に関しても、今後解明していく予定である。

##### 参考文献

- 1) 中央防災会議：東南海、南海地震等に関する専門調査会（第16回）資料，2003。
- 2) 平成16年度神戸市防災会議：神戸市地域防災計画，地震対策編，東南海・南海地震防災対策推進計画，2004。
- 3) 山本正昭，中山哲蔵，坂井淳，三橋宏次：日本海中部地震津波による漁港内の漁船被害，海岸工学講演会論文集，第32巻，pp.460-464，1985。
- 4) 明田定満，谷野賢二，水野雄三，佐藤仁，寺内啓：港湾漁港施設による津波被害の低減効果について，海岸工学論文集，第41巻，pp.1176-1180，1994。
- 5) 後藤智明：津波・高潮の数値シミュレーション手法について，昭和63年度港湾技術研究所講演会，pp.41-86，1988。
- 6) Mansinha, L. and D. Smylie: The displacement fields of inclined faults, Bull., Seimol. Soc. Am., Vol.61, pp.14-33, 1971.
- 7) 後藤智明，小川由信：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学土木工学科資料，1982。
- 8) 相田勇：南海道沖の津波の数値計算，東大地震研究所彙報，Vol.56, pp.713-730, 1981。
- 9) 久保雅義：東海・東南海・南海で発生する津波と被害の予測および津波が船舶に与える影響，(社)日本海難防止協会情報誌「海と安全」，No.523, pp.28-31, 2004。
- 10) 港内長周期波影響評価マニュアル：(財)沿岸技術研究センター，2004。