

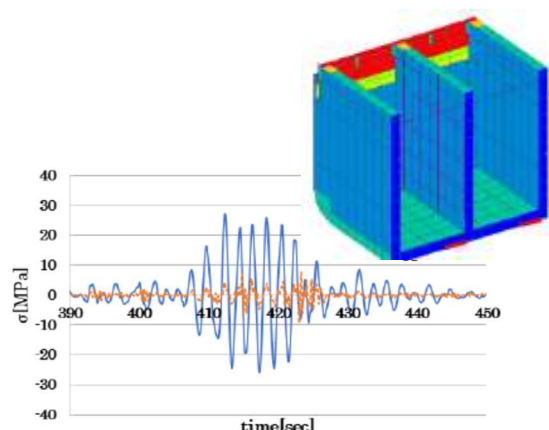
コンテナ船のホイッピング応答解析による 積付け変化が二重底面外曲げに与える影響の考察

Influences of Container Cargo Weight on Inner Bottom Response Using Whipping Response Analysis

技術研究所 構造研究 G

宮下 哲治

MIYASHITA Tetsuji



概 要

コンテナ船において、大型化に伴うホールド二重底部の幅広化とコンテナ貨物の重量増加により、二重底部の固有振動数が低下し、船体のホイッピング応答より二重底面外曲げが大きくなることが懸念される。そこで、9300TEU コンテナ船を対象とし、不規則波中の時刻歴応答計算を行い、波浪応答・ホイッピング応答それぞれの二重底面外曲げと船体縦曲げの相関、および積付け条件の変更に対する二重底部に生じるホイッピング応答の増減について考察した。その結果、コンテナ重量増に対して、ホイッピング応答の影響は小さいことを示した。

Summary

In recent years, due to the enlargement of container ships, hull girder bending strength and inner bottom bending rigidity are becoming relatively smaller, posing concerns on the increased whipping responses and their adverse effect on the longitudinal hull girder strength. In this study, the author investigated the correlations between inner bottom bending and hull girder bending of a 9,300 TEU container ship in irregular head seas, focusing on the influence of container stowage conditions. As a result, it was shown that heavier cargo was safety side in terms of the longitudinal hull girder strength.

1. 緒 言

コンテナ船では一般的に水圧に比べ貨物重量が相対的に小さいため、二重底部では下から突き上げる荷重が作用しホギング状態となる。また、水圧とコンテナ荷重により二重底面外曲げ応力が発生し、船体縦曲げ応力と重畳する¹⁾。さらに、コンテナ船の大型化により二重底幅が大きくなることで相対的に二重底部の曲げ剛性が低下することが懸念される。ホイッピング応答に着目すると、二重底部の幅広化とコンテナ貨物の重量増加により、二重底部の固有振動数がますます低

下する。その結果、二重底部の固有振動数がホイッピング応答の振動数に近づき、二重底面外曲げが増大する可能性がある。

そこで、9300TEU コンテナ船を対象とし、不規則波中の時刻歴応答計算を行い、波浪応答・ホイッピング応答それぞれの二重底面外曲げと船体縦曲げの相関、および積付け条件の変更に対する二重底部に生じるホイッピング応答の増減について考察した。

2. 解析方法

解析方法としては、ランキンソース法に基づく不規

則波中の非定常・非線形時刻歴船体運動計算と、その結果から得た波浪外圧と船体運動による慣性力を 3D FEM モデルに与え、Newmark- β 法に基づく応答計算を行った^{2,3)}。ここでは、ISSC1964 波スペクトラムに則って正面向波、長波頂不規則波を生成した。1 ケース当たり 4096 step (1 step = 0.07s) の計算となることから、不規則波を乱数で生成し、16 回分の計算を行うことで約 80 分相当のデータを得た。上記より得られた二重底外板部および内底板部の船長方向の応力を、0.3 Hz を Cutoff 周波数とし Low-pass、High-pass-filter をかけて波浪応答とホイッピング応答に、また式(1)、式(2)により船体縦曲げ応力 σ_g と二重底面外曲げ応力 σ_l に分離した。

$$\sigma_b = \sigma_g + \sigma_l \quad (1)$$

$$\sigma_{ib} = \alpha_1 \sigma_g - \alpha_2 \sigma_l \quad (2)$$

ここで、

σ_b : 外板部の船体縦方向応力

σ_g : 外板部の船体縦曲げ応力

σ_l : 外板部の二重底面外曲げ応力

σ_{ib} : 二重底部の船体縦方向応力

α_1 : 船体縦曲げに起因する外板部に対する内底板部の応力比

α_2 : 二重底面外曲げに起因する外板部に対する内底板部の応力比

3. 船体縦曲げと二重底面外曲げの相関

図 1 のように Hold を水密隔壁(W.T.BHD)で区切り、A~E に分け、各 Hold の中央部と端部に対して船体縦曲げと二重底面外曲げの相関性を調査した。

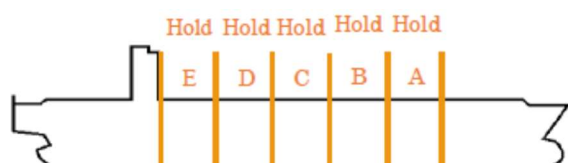


図 1 各ホールドの名称

Fig.1 Location of each hold.

一例として、図 2 に Hold C の構造モデルを示す。赤線にて Hold 中央部及び Hold 端部の応力検出位置を示す。外板側が σ_b 、二重底部側が σ_{ib} である。図 3、図 4 に Hold C 中央部・端部における波浪応答の σ_g と σ_l の時刻歴を示す。同様に、ホイッピング応答の時刻歴を図 5、図 6 に示す。

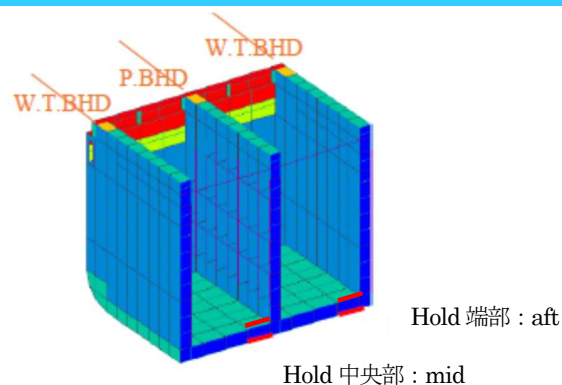


図 2 各ホールドでの応力の評価位置

Fig.2 Evaluation positions of stress at each hold.

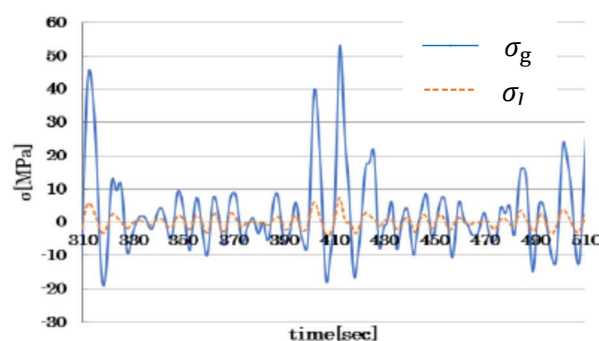


図 3 波浪応答成分の応力時刻歴 (HOLD 中央部)

Fig.3 Decomposed stress in wave component (mid).

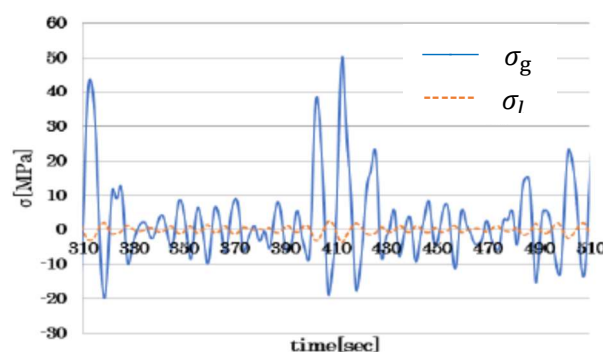


図 4 波浪応答成分の応力時刻歴 (HOLD 端部)

Fig.4 Decomposed stress in wave component (aft).

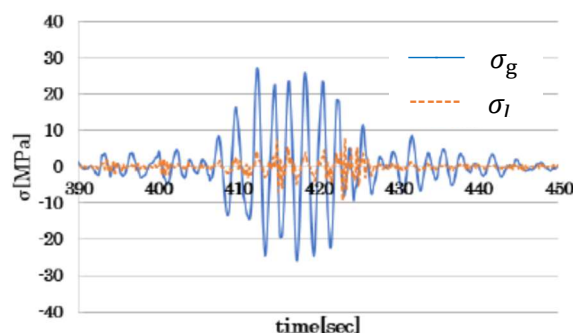


図 5 ホイッピング応答の応力時刻歴 (HOLD 中央部)

Fig.5 Decomposed stress in whipping component (mid).

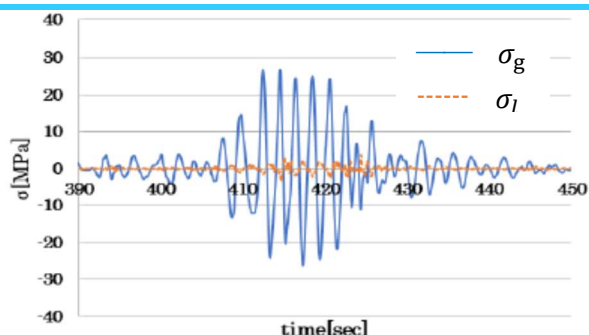


図6 ホイッピング応答の応力時刻歴 (HOLD 端部)

Fig.6 Decomposed stress in whipping component (aft).

波浪応答・ホイッピング応答に対し、 σ_g と σ_l の位相差を定量的に示すために相関係数 r を以下の式(3)より求めた。なお、本係数 r が1に近いほど両成分が同位相となり、-1に近いほど逆位相であることを示す。

$$r = \frac{\sigma_{b,s}^2 - \sigma_{g,s}^2 - \sigma_{l,s}^2}{2\sigma_{g,s}\sigma_{l,s}} \quad (3)$$

ここで、

$\sigma_{b,s}$: 船体縦曲げ応力と二重底面外曲げ応力の合応力の両振幅有義値

$\sigma_{g,s}$: 船体縦曲げ応力の両振幅有義値

$\sigma_{l,s}$: 二重底面外曲げ応力の両振幅有義値

各評価位置での ρ 、 $\sigma_{b,s}$ 、 $\sigma_{g,s}$ 、 $\sigma_{l,s}$ を表1、表2にまとめる。この結果、波浪応答とホイッピング応答のいずれにおいても Hold C の中央部で相関係数 r が1に近く、同位相に近い応答特性を持つ。すなわち、両成分の極大値の発生するタイミングが完全に一致すれば、両者の有義値を足し合わせた応力は、合応力($\sigma_{b,s}$)になる。逆に r が1よりも小さくなると両成分の極大値の発生するタイミングが一致しなくなることを意味する。また、船首・船尾部にいくと相関が弱まる傾向にある。Hold C の中央部で船体縦曲げ応力と二重底面外曲げ応力の比は波浪応答で約5:1、ホイッピング応答で約6:1となった。

4. 積付重量が二重底曲げに与える影響

4.1 計算ケース

積付け重量の変化とそれに伴う二重底面外曲げの固有振動数の変化が二重底面外曲げ挙動に与える影響を調査した。積付け重量は0トンから10,739トンまでの5ケースを検討した。表3に積付けケースを示す。積付け重量の変化は、Hold C の二重底部の比重を変えることで再現した。

表1 二重底部の縦曲げ応力と面外曲げ応力の相関係数 (波浪応答)

Table 1 Correlation factors between global and local components (wave component).

Positions	$\sigma_{g,s}$ [MPa]	$\sigma_{l,s}$ [MPa]	$\sigma_{b,s}$ [MPa]	Correlation Factors r
E AFT	50.23	3.748	46.74	-0.936
E MID	42.72	3.439	44.99	0.637
DAFT	40.92	1.811	39.36	-0.867
D MID	41.58	7.187	48.37	0.935
CAFT	41.56	4.245	37.50	-0.961
C MID	41.72	7.680	49.25	0.977
BAFT	41.37	3.869	38.31	-0.808
B MID	40.69	6.639	45.31	0.654
AAFT	37.46	1.054	37.44	-0.033
AMID	35.28	2.677	35.15	-0.086
AFORE	27.35	3.287	28.29	0.231

表2 二重底部の縦曲げ応力と面外曲げ応力の相関係数 (ホイッピング応答)

Table 2 Correlation factors between global and local components (whipping component).

Positions	$\sigma_{g,s}$ [MPa]	$\sigma_{l,s}$ [MPa]	$\sigma_{b,s}$ [MPa]	Correlation Factors r
E AFT	37.79	3.662	35.86	-0.562
E MID	36.32	4.523	38.31	0.390
DAFT	34.78	2.028	34.00	-0.409
D MID	35.57	6.444	40.51	0.729
CAFT	35.93	2.626	33.72	-0.850
C MID	36.92	5.695	41.82	0.840
BAFT	37.49	1.981	35.74	-0.889
B MID	38.06	5.142	41.57	0.647
AAFT	39.15	1.098	39.50	0.306
AMID	40.17	2.718	40.54	0.103
AFORE	36.24	3.177	37.53	0.369

表3 二重底部の積付け重量 (Hold C)

Table 3 Specific gravity of double bottom (Hold C).

ケース	①	②	③	④	⑤
二重底部の 比重 $[\text{t/m}^3]$	7.85	36.53	81.78	110.47	147.42
船殻重量+ 積付け重量 [t]	602	2,809	6,290	8,497	11,341

4.2 波浪応答成分

Hold C に限定し、波浪応答に関して、各ケースの船体縦曲げ応力の有義値 ($\sigma_{g,s}$)、二重底面外曲げ応力の有義値 ($\sigma_{l,s}$)、及び相関係数 (r) を表 4 に示す。ここで、ケース名”Original”は3章の検討結果である。ケース⑤は、ケース①と比べて $\sigma_{g,s}$ が12%の増加である。一方、 $\sigma_{l,s}$ は80%増加している。相関係数は0.9を上回っており、Hold 重量にかかわらず強い相関がある。 $\sigma_{l,s}$ がHold 重量増に伴って増大する主な原因として、船体上下運動により二重底部に作用する慣性力が、重量とともに増大することが考えられる。本計算から得られた heave 運動から加速度を求め、ピーク値の上位1/3 有義値を計算すると0.565 [m/s²]となった。これに Hold C の各ケースの重量を掛け、船底外板部の面積で割ったものを船底部にかかる単位面積当たり慣性力の有義値とし、波浪応答の $\sigma_{l,s}$ との相関図として図 7 にまとめた。グラフ内の点線は線形近似式である。図7より、慣性力と $\sigma_{l,s}$ は線形関係にあり、二重底面外曲げ応力が、慣性力の増大に伴って増大していくことがわかった。

表 4 積み付け重量に対する二重底部の縦曲げ応力と面外曲げ応力相関係数（波浪応答）

Table 4 Stress components and correlation factors (Wave components, Hold C mid).

Case	$\sigma_{g,s}$ [MPa]	$\sigma_{l,s}$ [MPa]	r
①	39.97	6.077	0.923
②	41.44	7.290	0.910
Original	41.72	7.680	0.977
③	43.35	9.065	0.922
④	43.34	10.07	0.965
⑤	44.90	10.96	0.939

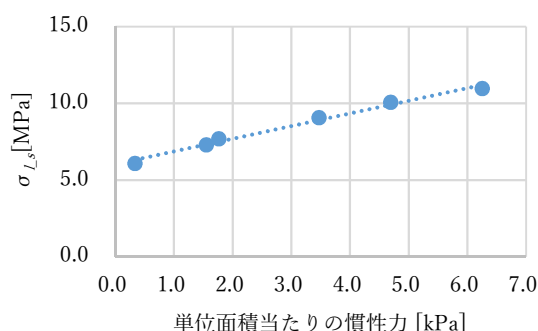


図 7 慣性力と二重底部の面外曲げ応力の相関関係（波浪応答）

Fig.7 Relation between double bottom inertia force and double bottom bending stress (wave components).

4.3 ホイッピング応答成分

Hold C に限定し、ホイッピング応答成分に関して、各ケースの $\sigma_{g,s}$ 、 $\sigma_{l,s}$ 及び r の結果を表 5 に示す。各ケースにおける二重底面外曲げ固有振動数をあわせて示す。二重底部の固有振動数は図 1 に示したモデルの Hold A~E の W.T.BHD 断面における外板上のすべての節点を z 方向に固定し固有値計算により求めた。なお、付加水質量も考慮した。

表 5 では $\sigma_{g,s}$ に対して積付けによる有意な違いが見られない。一方、 $\sigma_{l,s}$ に対しては、ケース⑤がケース①に対して1.49倍大きくなった。 ρ は0.7~0.85 の範囲にあり、やや強い相関が窺われる。固有振動数は Hold 内の貨物重量の増加に伴い減少している。二重底面外曲げ応力の有義値が貨物重量の増加に伴って増大する主要因として、ホイッピングによる二重底部の上下方向の慣性力が、貨物重量増とともに増大することが考えられる。その検証のため、本計算結果から、波浪応答の場合と同様に船底部にかかる慣性力を求めた。単位面積当たり慣性力を横軸に、ホイッピング応答の二重底面外曲げ応力の有義値 $\sigma_{l,s}$ を縦軸にしてグラフにまとめたものを図 8 に示す。図 8 より慣性力と二重底面外曲げ応力の有義値はほぼ線形関係にあることが分かる。このことは Hold 重量の増大によって二重底部の固有振動数が低下しても、ホイッピングによる起振力は準静的に作用していることを示唆している。この点を次節にて考察する。

表 5 積み付け重量に対する二重底部の縦曲げ応力と面外曲げ応力相関係数（ホイッピング応答）

Table 6 Stress components and correlation factors (Whipping components, Hold C mid).

Case	$\sigma_{g,s}$ [MPa]	$\sigma_{l,s}$ [MPa]	r	二重底部の固有振動数 [Hz]	加速度 [m/s ²]
①	36.17	4.868	0.848	2.942	0.387
②	35.72	5.312	0.811	2.903	0.347
Original	36.92	5.695	0.840	2.843	0.372
③	36.40	6.197	0.761	2.762	0.365
④	35.77	7.031	0.695	2.654	0.355
⑤	37.00	7.243	0.716	2.545	0.355

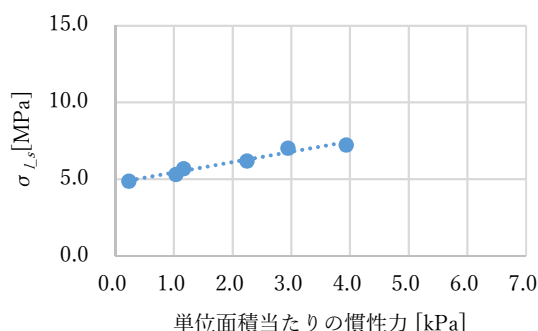


図 8 慣性力と二重底部の面外曲げ応力の相関関係（ホイッピング応答）

Fig.8 Relation between double bottom inertia force and double bottom bending stress. (whipping components)

4.4 二重底面外曲げへの動的影響に関する考察

ばね-質量系における強制振動について考える。減衰を無視すると強制変位振動数が固有振動数に近づくほど強制変位に対する質点の相対変位振幅比は無限大に近づいていく。このときの相対変位応答振幅は式(4)で表される。

$$\frac{x_0}{a} = \left| \frac{m\omega^2}{k - m\omega^2} \right| \quad (4)$$

ここで

ω : 強制振動の振動数

x_0 : 動的過程の場合のばね-質量系における質点の
ばね基部からの相対変位振幅

a : 強制変位の振幅

m : 質量

k : ばね定数

一方、十分に強制変位の振動数が小さく、ばね-質量系の質点が準静的な挙動を示す場合について考える。このときの相対変位応答振幅は式(5)で表される。

$$\frac{x'_0}{a} = \frac{m\omega^2}{k} \quad (5)$$

ここで

x'_0 : 準静的過程の場合のばね-質量系における質点の
ばね基部からの相対変位振幅

強制振動数 ω と系の固有振動数 ω_0 の比を横軸に、式(4)および式(5)で示した相対変位応答振幅を縦軸としたグラフを図 9 に示す。二重底部の応答をばね-質量系の応答と仮定し、ホイッピング応答により二重底部が動的な挙動を示す場合の相対変位応答振幅を x_0 とみなし、準静的な挙動を示す場合の相対変位応答振幅を x'_0 とみなす。また二重底部の固有振動数 ω_0 とし、ホイッ

ピング応答の振動数 ω を3.14rad/sとする。この場合、二重底部の固有振動数が一番低いケース ($\omega_0 = 15.99\text{rad/s}$)においても、ホイッピング応答の振動数との比は約 5 : 1($\omega/\omega_0 = 0.196$)となり、図 9 の赤線で示すとおり $\omega/\omega_0 = 1$ から十分に離れている。二重底部の固有振動数が一番高いときの x_0/x'_0 は 1.030、二重底部の固有振動数が一番低いときの x_0/x'_0 は 1.040 となり、何れにおいても x_0 は x'_0 にほぼ等しい値をとった。その為、Hold 内の重量を増加しても二重底部の励振は準静的に発生し動的影響は見られない。また、表 5 よりホイッピング応答に伴う二重底部の上下振動加速度は重力加速度よりも十分に小さく、二重底部に作用する慣性力によって押し上げる力よりもコンテナ貨物重量により二重底部を静的に押し下げる力の方が必ず大きくなるということが分かる。以上のことから、本船に関してコンテナ貨物重量が大きい場合であっても船体縦曲げ応力と二重底部のホイッピング応答との重畳に関して危険側にはならないことを示した。

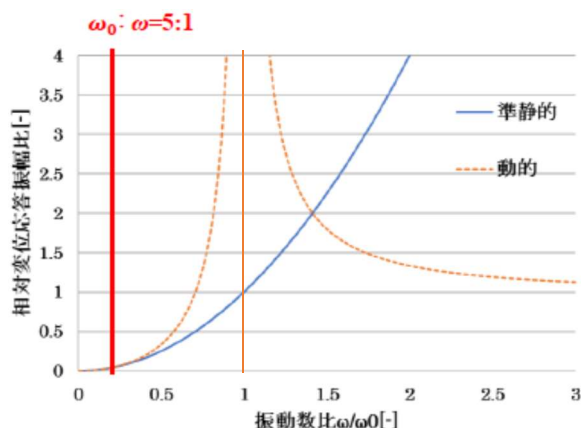


図 9 強制振動時のばね-質量系における質点のばね基部からの相対変位振幅

Fig.9 Relative displacement amplitude of spring-mass system due to forced vibration.

5. 結論

本論文では 9300TEU コンテナ船を対象として不規則波中の時刻歴船体運動計算・応答計算を計算し、波浪応答とホイッピング応答それぞれの二重底面外曲げ応力成分と船体縦曲げ応力成分の相関を明らかにした。また、積付け重量が大きくなることは、重力による下向きの力を増大させる効果の方が大きく、船体縦曲げ応力とホイッピング応答の重畳に関して危険側にはならないことを明らかにした。

本稿は、横浜国立大学大学院工学研究院 岡田教授・川村教授との共同研究の成果^{4,5)}を基に作成したものである。

参考文献

- [1] 日本海事協会大型コンテナ船安全検討会：大型コンテナ船安全検討会報告書，2014.
- [2] 小早川広明，岡田哲男，楠本裕己，長島智樹，根木勲：コンテナ船船体の動的弾性応答計算に基づく構造健全性評価－第 1 報 向波中の非定常時刻歴船体運動解析－，日本船舶海洋工学会論文集第 22 号，pp.161-173,2015.
- [3] 川崎洋平，岡田哲男，小早川広明，天谷一朗，宮下哲治，長島智樹，根木勲：コンテナ船船体の動的弾性応答計算に基づく構造健全性評価－第 2 報 船体剛性の影響及び二重底面外曲げと船体縦曲げの相関－，日本船舶海洋工学会論文集第 25 号，pp.191-203,2017.
- [4] 大戸綾乃，岡田哲男，川村恭己，宮下哲治，長島智樹：ホイッピング応答における二重底面外曲げと船体縦曲げの相関に及ぼすコンテナ貨物重量の影響について，日本船舶海洋工学会講演会論文集第 26 号，pp.211-216, 2018.
- [5] Oto, A., Okada, T., Kawamura, Y., Miyashita, T. and Nagashima, T.: Influences of container cargo weight and its distributions on whipping response of a large container ship, The 32nd Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM2018), Wuhan, China, pp.502-509, 2018.



宮下哲治