

共同研究
「ローカル荷重の影響を考慮した
実用的縦曲げ最終強度評価法の開発」
最終報告書

2015年1月

国立大学法人 大阪大学
独立行政法人 海上技術安全研究所
一般財団法人 日本海事協会

Contents

1. 共同研究の概要
2. 研究の背景
3. 本研究によって期待される効果
4. 活動経過
5. 水圧及び船幅方向応力が働く際の防撓パネルの軸方向
応力-ひずみ関係の推定法
6. 二重底構造に発生する応力の推定法
7. ローカル荷重が働く際の縦曲げ最終強度の推定
8. まとめ

1. 共同研究の概要

共同研究者

- 国立大学法人 大阪大学
- 独立行政法人 海上技術安全研究所
- 一般財団法人 日本海事協会

実施期間

- 2014年5月～2015年1月

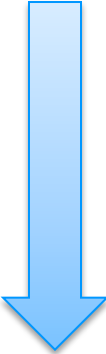
実施内容

- 水圧及び船幅方向応力が働く際の防撓パネルの軸方向応力－ひずみ関係の推定法
- コンテナ船の二重底構造に発生する応力の推定法の開発
- ローカル荷重が働く際の縦曲げ最終強度の推定法の開発

2. 研究の背景

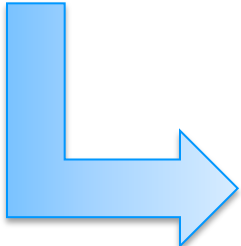
大型コンテナ船安全検討会

今後NKが取るべきアクションプランとして
ローカル荷重の影響を考慮した縦曲げ最終強度評価の必要性を指摘



現状では、ホールドモデルの弾塑性解析でしかローカル荷重の影響を考慮できない。
→設計時の強度評価法としては不向き

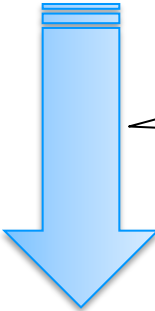
縦曲げモーメントと同時に働くローカル荷重の
縦曲げ最終強度への影響を考慮できる簡易的な評価手法が必要

- 
- 水圧及び船幅方向応力が働く際の防撓パネルの軸方向応力－ひずみ関係の推定法の開発
 - 海水圧及びコンテナ荷重を受けるコンテナ船の船底外板及び内底板に発生する応力の簡易推定法の開発
 - ローカル荷重が働く際の縦曲げ最終強度の推定法の開発

3. 本研究によって期待される効果


縦曲げ最終強度要件

- 調和CSRを始め様々な構造規則に採用。
- 船体に縦曲げモーメントのみが働いている状態を仮定して強度評価を行い、ローカル荷重の影響は安全率で考慮。



構造配置及び寸法によるローカル荷重の影響度の差異までは定量的に考慮できない。

本共同研究により、船体が海水や貨物から荷重を受ける現実の荷重状態を考慮し、縦曲げ最終強度を精度良く評価する簡易手法を確立



本評価法に基づくNK規則の策定により、船舶にとって最も深刻な損傷である船体折損を起こさずに耐える能力である縦曲げ最終強度について、ローカル荷重の影響をより合理的な形で評価可能

4. 活動經過

研究開始より終了まで本研究のミーティングを計8回実施

名称	日時	場所	参加社
第1回	2014年5月28日	NK本部(東京)	大阪大学、NMRI、NK
第2回	2014年7月15日	大阪大学(大阪)	大阪大学、NMRI、NK
第3回	2014年8月29日	NMRI(東京)	大阪大学、NMRI、NK
第4回	2014年10月9日	NK本部(東京)	大阪大学、NMRI、NK
第5回	2014年11月4日	大阪大学(大阪)	大阪大学、NMRI、NK
第6回	2014年12月6日	NK本部(東京)	大阪大学、NMRI、NK
第7回	2014年12月24日	大阪大学(大阪)	大阪大学、NMRI、NK
第8回	2015年1月22日	NK本部(東京)	大阪大学、NMRI、NK

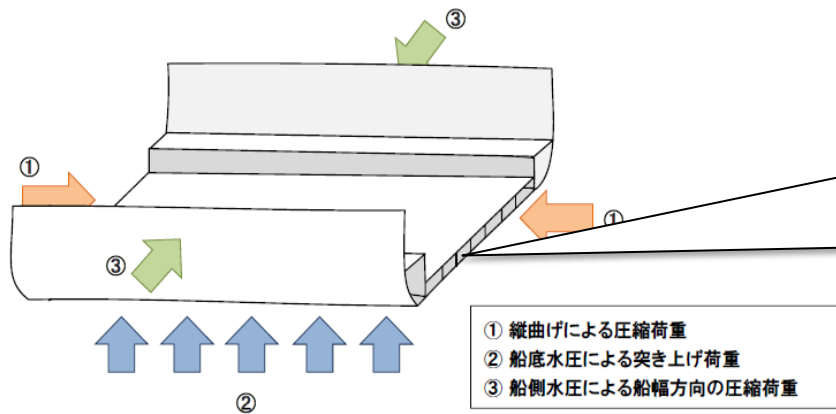
5. 水圧及び船幅方向応力が働く際の防撓パネルの 軸方向応力－ひずみ関係の推定法

背景

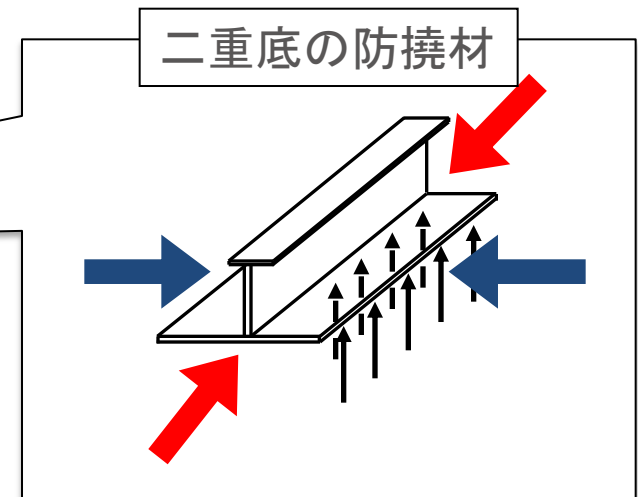
水圧及びコンテナ荷重によって、二重底曲げが生じ、船底外板には二軸の圧縮応力が、内底板には二軸の引張応力が発生



二重底曲げを考慮した縦曲げ最終強度をSmith法によって推定するにあたり、水圧及び船幅方向応力の影響を考慮した船長方向の応力-ひずみ関係が必要



二重底曲げを引き起こす荷重



評価手法

Smith法で用いるための、水圧及び船幅方向応力が働く際の防撓パネルの船長方向応力-ひずみ関係の推定法として、2種類の方法を提案

改良版Gordoの式

CSRにおいて応力-ひずみ関係の推定に採用されているGordo-Soaresの簡易算式に、幅方向圧縮応力の影響を考慮出来る様、改良した簡易算式

OUV算式

- 水圧及び幅方向圧縮の影響を考慮した平均圧縮応力-平均圧縮ひずみ関係を推定できる。
- 最終強度前と最終強度後で異なる方法で平均圧縮応力-平均圧縮ひずみ関係を推定する。

改良版Gordoの式の概要

細長比パラメータ

$$\beta_E = \frac{s}{t_p} \sqrt{\frac{\sigma_Y \bar{\varepsilon}}{E}} = \sqrt{\frac{k\pi^2}{12(1-\nu^2)}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_Y}{\sigma_E / \bar{\varepsilon}}} \dots (1)$$

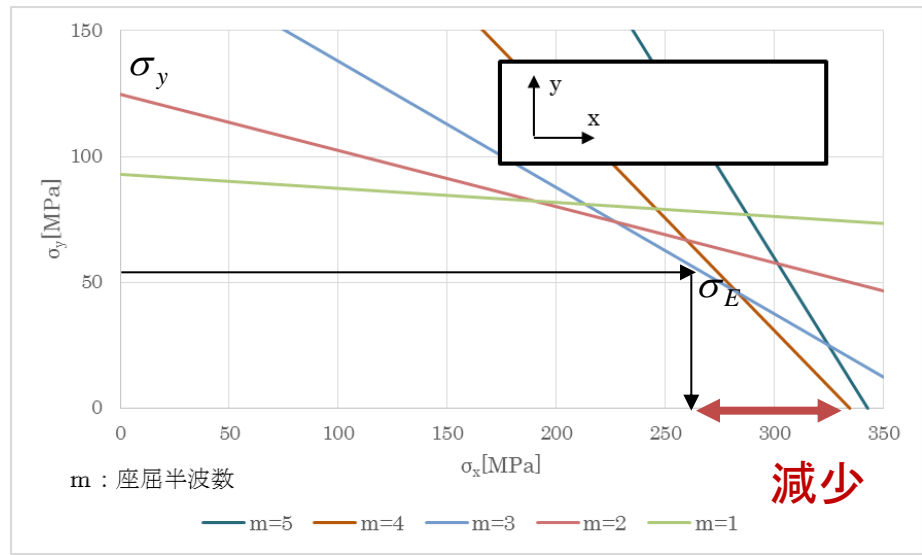
細長比をひずみによる増加関数と仮定しており、ひずみの増加に伴い細長比が増加。
 → **耐力低下を再現。**

幅方向圧縮を考慮した長さ方向の弾性座屈強度

$$\sigma_E = \frac{D\pi^2}{b^2 t} \left(\frac{m_L b}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 - \left(\frac{a}{mb} \right)^2 \sigma_y \dots (2)$$

(2)式の座屈相関関係に従い、長さ方向の弾性座屈応力を減ずる。
 →(1)式の細長比パラメータが増加。
 →見かけ上薄板となり、**剛性及び最終強度を低下させる。**

座屈強度相関関係図



OUV算式の概要 (最終強度前)

板の剛性、有効幅

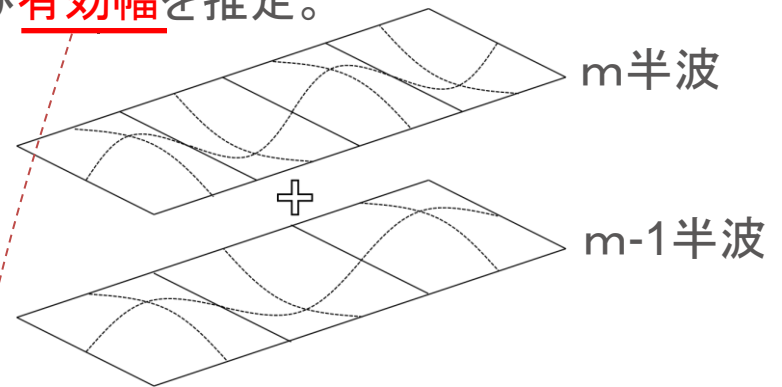
座屈半波数の変化を考慮するため、2モードのたわみを仮定し、弾性大たわみ理論を適用。
 →幅方向圧縮を考慮した、板の長辺方向剛性及び有効幅を推定。

たわみ

$$w = A \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{a}\right) + B \sin\left(\frac{(m-1)\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{a}\right)$$

応力 - ひずみ関係

$$\varepsilon_{px} = \frac{1}{E} \sigma_{px} - \frac{\nu}{E} \sigma_{py} + \frac{\pi^2}{8a^2} \left\{ (A^2 - A_0^2) m^2 - (B^2 - B_0^2) (m-1)^2 \right\}$$



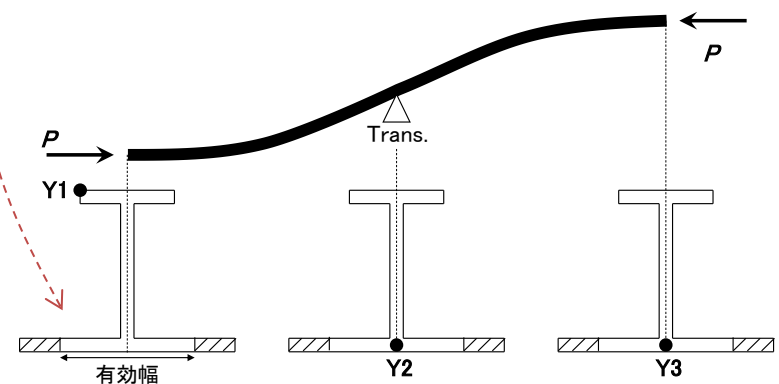
最終強度の判定

防撓パネルを梁としてモデル化

初期降伏が生じた時点を最終強度と判定する。

$$\sigma_Y = \sigma_P + \sigma_B + \sigma_{WB} + \sigma_{BT}$$

軸応力 = 一様な圧縮応力 + 曲げ応力 + 水圧による曲げ応力、反り応力



OUV算式の概要(最終強度後)

板の剛塑性機構

座屈1半波長の領域に塑性変形が生じ、その他の領域では弾性除荷が生じると仮定。

応力-たわみ関係

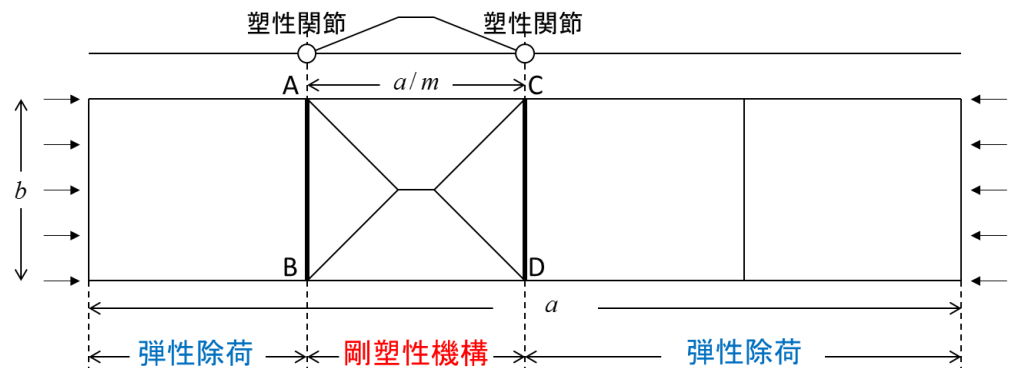
$$A = \left(\frac{m_{45} + (\alpha - 1)m_0/2 + m_{90}/2}{\sigma_x/\sigma_Y} t \right) / (\sigma_x/\sigma_Y)$$

理論解

応力 - ひずみ関係

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x + \frac{2}{ab} (A^2 - A_0^2)$$

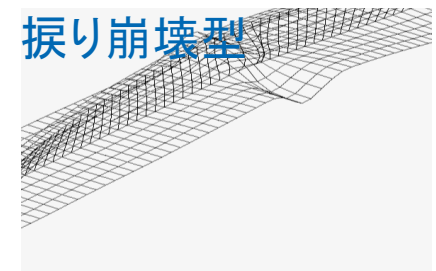
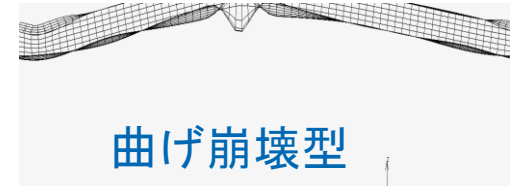
無視している弾性変形を形式的に考慮するため、たわみを **応力 / 降伏応力** で除する。
 →弾塑性FEMの結果と一致。



OUV算式の今後の課題

梁モデルへの拡張

防撓材の崩壊モード(捩り崩壊型、曲げ崩壊型を想定)を考慮できるモデルへの拡張を行う。
→最終強度後の精度向上

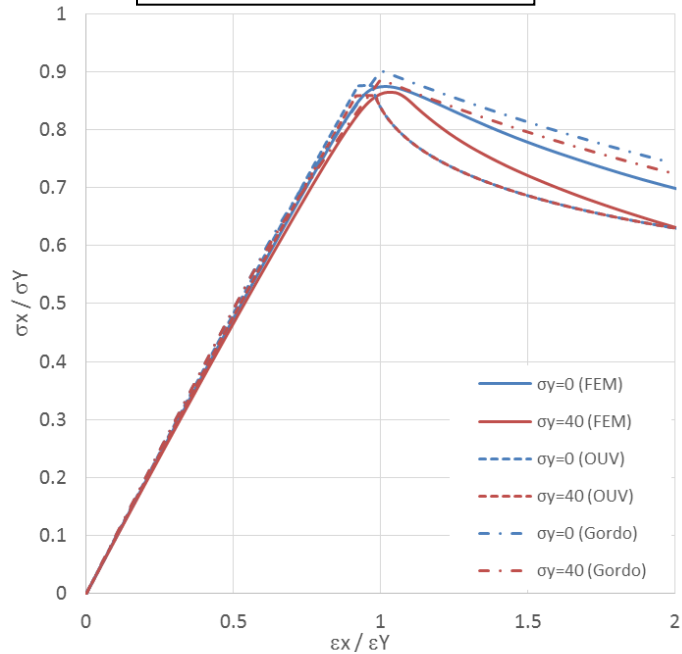


FEMによるシリーズ計算

様々な防撓パネルの寸法及び形状に対して、FEMによるシリーズ解析を行う。
→ OUV算式の精度向上及び検証
→ OUV算式の適用範囲を明確化

各推定法の評価結果

改良版Gordoの式



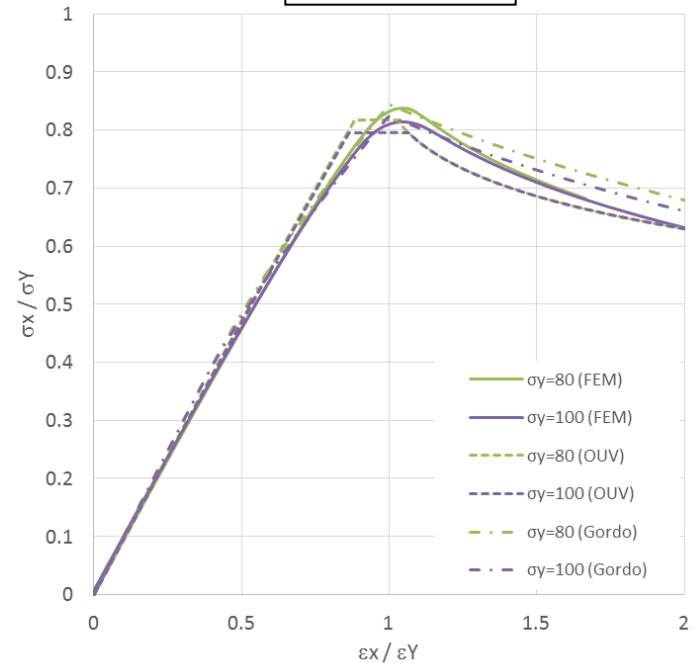
長所

算式を陽に表すことができる。
実績有り。

短所

初期不整、水圧影響及び最終強度後の挙動へのローカル荷重の影響の考慮が出来ない。

OUV算式



長所

物理的背景が明確。
水圧影響を考慮できる。
精度が高い。

短所

算式を陽に表すことができない。

総括及び今後の課題

- 防撓パネルのレベルでは、改良版Gordoの式、OUV算式ともに、最終強度を精度よく推定できる。（＝幅方向圧縮の影響を適切に考慮できている。）
- 両推定法とも最終強度後の耐力について、FEM結果と誤差がある。
- 改良版Gordoの式は現行規則の多少の修正であり、陽に解を求めることができる。その反面、初期たわみや水圧の影響を考慮することができない。
- OUV算式は物理モデルがベースであり、初期たわみの影響を考慮できるなど汎用性が高い。一方、数値計算が不可欠となる。
- 推定法単体の精度だけではなく、両推定法を採用したSmith法の精度を考慮して、どちらの手法を採用するか判断する必要がある。

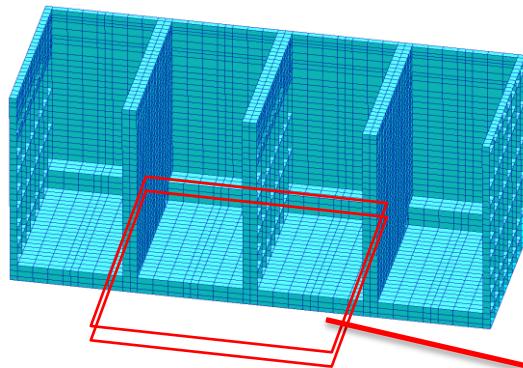
6. 二重底構造に発生する応力の推定法

背景

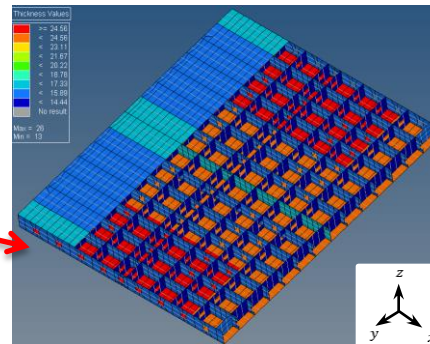
ローカル荷重を考慮できる拡張Smith法のインプットとして、
二重底の応力分布が必要



ホールドの構造寸法から、海水圧及びコンテナ荷重を受ける際の船底外板及び内
底板の応力分布を推定する簡易手法の開発が必要

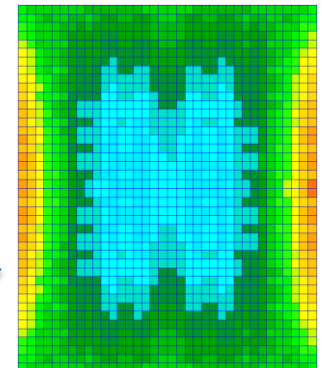


二重底



簡易手法に
よる推定

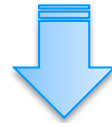
応力分布



作業手順

Step1

二重底を一枚の異方性板と見なしローカル荷重が作用するときの応力状態を定式化(不確定パラメータはFEMと合うように決定)



Step2

数値プログラムで応力分布を計算(陽な式ではないため)



Step3

数値プログラムを用いて要因解析を行い、陽な式で応力分布を推定

対象モデル

対象モデルは8000TEUのコンテナ船5隻

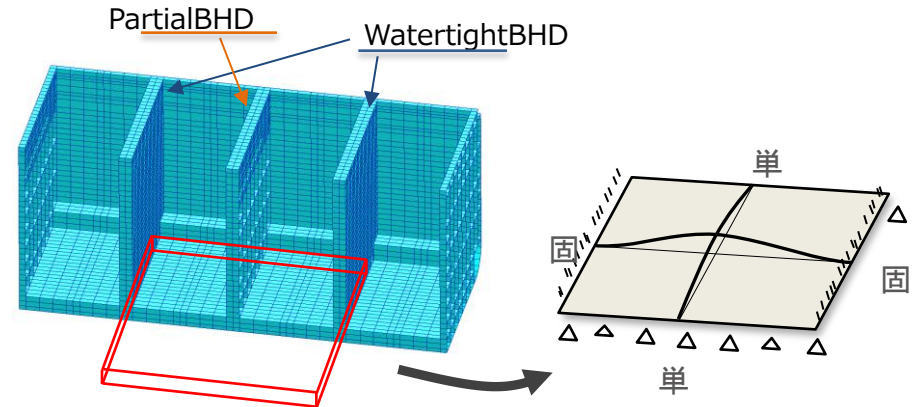
二重底のモデル化

Shade理論を用いて、二重底の異方性板としての曲げ剛性を導出する。

範囲 : Watertight Bulkhead間の
1ホールドスペース

境界条件: 長手方向 固定端
幅方向 単純支持

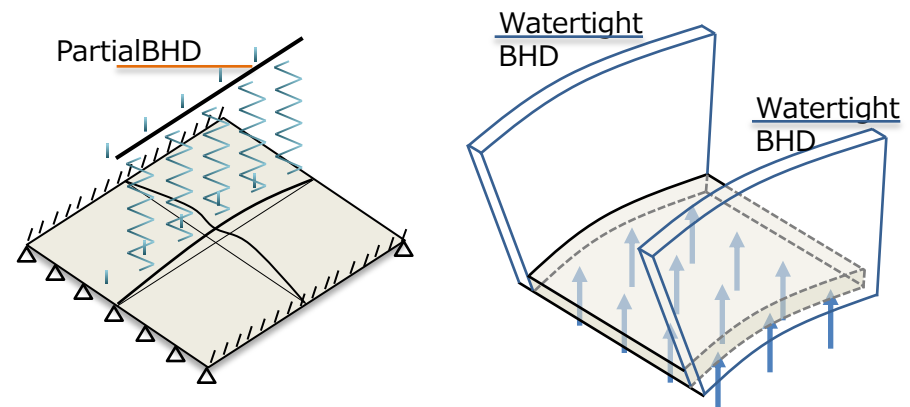
$$\text{撓み式} : w = \sum_m \sum_n A_{mn} \left(1 - \cos \frac{2\pi m}{a} x\right) \sin \frac{\pi n}{b} y$$



Bulkheadのモデル化

Partial Bulkheadはホールド中央に位置するバネと考える。

Watertight Bulkheadは船底水圧を受けることで変形が生じ、その変形量が二重底に重畳すると考える。

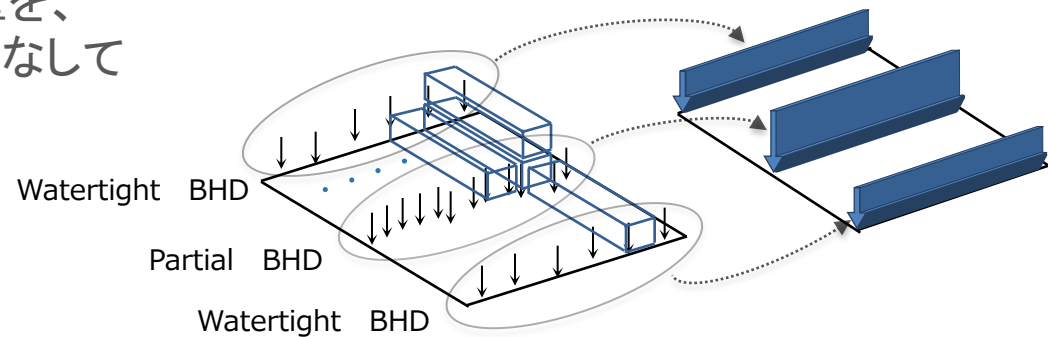
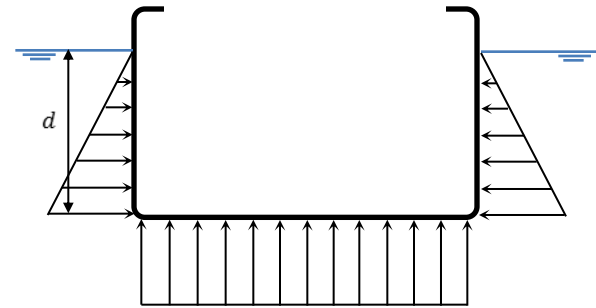


荷重のモデル化

水圧は満載喫水時の静水圧で、船底と船側の2成分に分ける。

船底水圧は二重底の突き上げ、船側水圧は船幅方向の一様圧縮の要因と考える。

コンテナの四隅に作用する集中荷重を、ホールド中央に作用する線荷重と見なして与える。



エネルギー法による定式化

上記モデル化により求めた二重底及びPartial Bulkheadの歪エネルギー U_{DB}, U_{CB} 、船底水圧及びコンテナ荷重の仕事 W_p, W_C から、最小ポテンシャルエネルギーの原理

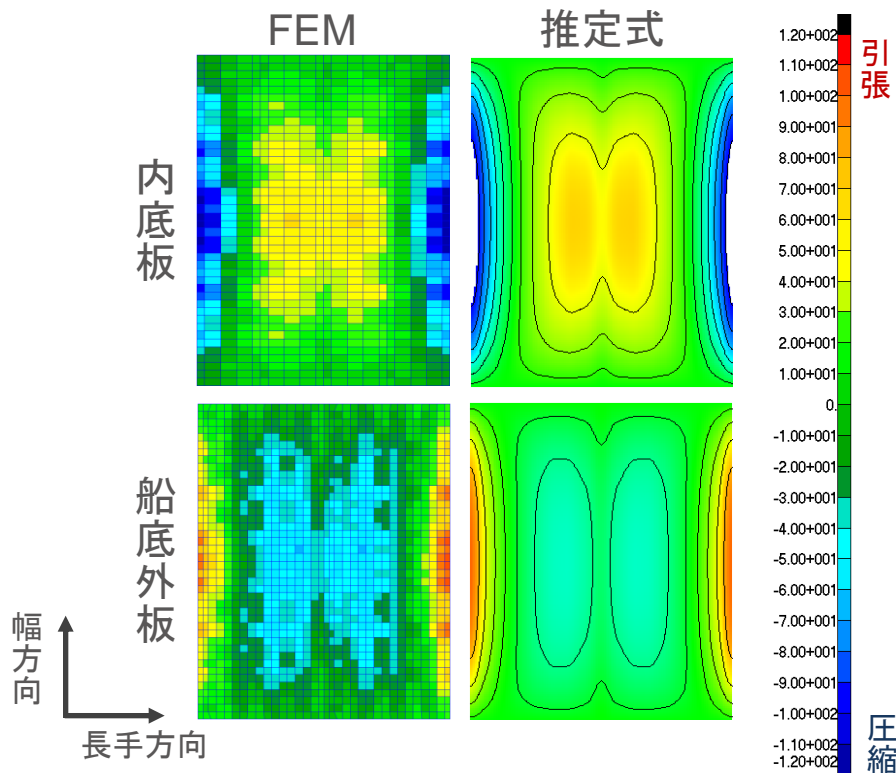
$$\delta(U_{DB} + U_{CB} - W_p - W_C) = 0$$

によって二重底の変形が求まり、応力分布が得られる。加えて、船側水圧による応力分布及びWatertight Bulkheadの変形による応力分布を二重底応力に足し合わせる。

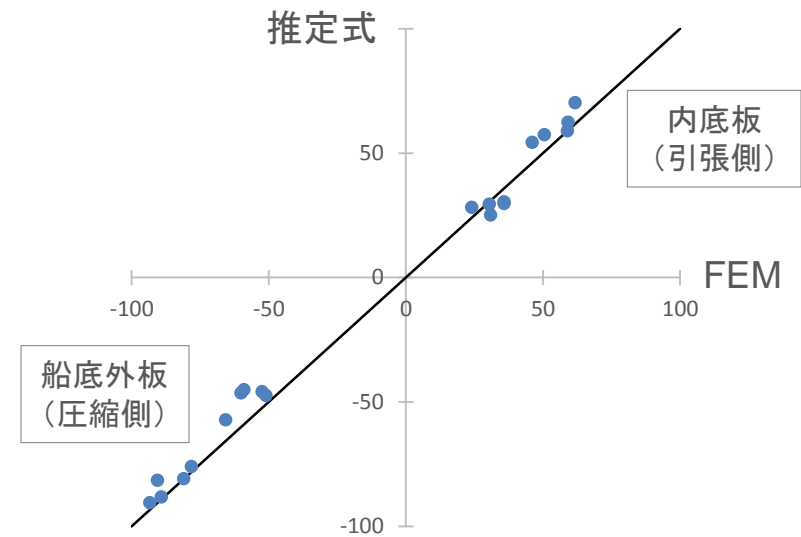
応力推定プログラムとFEMの比較

得られた応力の推定算式は連立方程式であり、陽な式ではない。
数値プログラムによって値を求め、FEMと比較する。

二重底の長手方向応力分布 σ_x



最大応力比較[MPa]



推定プログラムによる応力値は、FEMに対し約11%程度の精度を有することを確認。

簡易算式化

推定プログラムを用いて要因解析を行い、影響の少ない項は省略し、応力分布を与えるような式を導いた。

$$\text{二重底の応力算式} : \begin{cases} \sigma_x = \sigma_{xDB} + \sigma_{xWB} \\ \sigma_y = \sigma_{yDB} + \sigma_{yWB} + \sigma_{ys} \end{cases}$$

σ_{DB} は二重底の変形による応力、 σ_{WB} はWatertight Bulkheadの変形による応力、 σ_{ys} は船側水圧による応力。これらのうち数値プログラムが必要なのは σ_{DB} である；

$$\sigma_{xDB} = -\frac{E}{1-\nu^2} \left\{ (z-z_x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu(z-z_y) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right\}$$

$$\sigma_{yDB} = -\frac{E}{1-\nu^2} \left\{ (z-z_y) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu(z-z_x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right\}$$

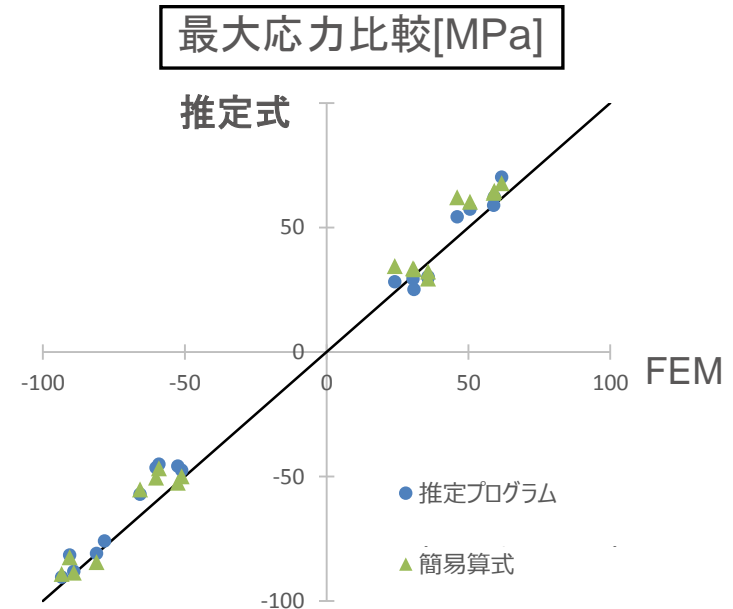
要因解析にて求めた各モードの撓み量[mm]は以下の通り

$$A_{11} = 4.6 - (4.1 \times 10^{-4}) \frac{b}{a^3} D_x + (6.4 \times 10^{-9}) \left(\frac{b}{a^3} D_x \right)^2 - (6.5 \times 10^{-5}) \frac{1}{ab} H \\ - (6.4 \times 10^{-7}) b k_l + (6.4 \times 10^{-8}) a b p_w - (6.8 \times 10^{-8}) b p_c$$

$$A_{21} = 1.6 - (1.4 \times 10^{-4}) \frac{b}{a^3} D_x + (2.7 \times 10^{-9}) \left(\frac{b}{a^3} D_x \right)^2 + (5.5 \times 10^{-9}) a b p_w$$

$$A_{13} = 0.037 - (2.3 \times 10^{-5}) \frac{a}{b^3} D_y + (4.0 \times 10^{-9}) a b p_w$$

$$A_{23} = 0.085$$



簡易算式による応力は、FEMに対し約12%程度の精度を有することが確認された。

今後、算式の更なる簡略化を行う。

総括及び今後の課題

- 二重底を異方性板と見なしたエネルギー法により、応力分布を求める推定プログラムを作成し、FEM結果と1割程度の誤差で収まる精度を有することを確認した。
→試計算モデルを増やし、精度及び適用性の検証を進める必要がある。
- NK規則取り入れを目指し、推定プログラムを基とした、簡易算式を作成した。
→推定に必要なパラメータが多く、式も複雑なため、引き続き簡略化を行っていく。

7. ローカル荷重が働く際の縦曲げ最終強度の推定

本推定法の評価手順

ローカル荷重の縦曲げ最終強度への影響を精度良く推定する。
推定法として2つの簡易手法を提案



- ① 拡張Smith法
- ② 船底外板の平均最終強度に基づく簡易評価法

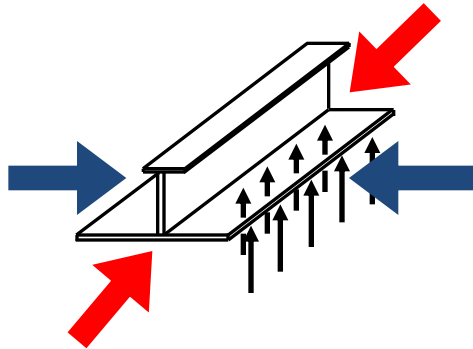
改良版Gordoの式及びOUV算式を用いて両簡易手法による試計算実施



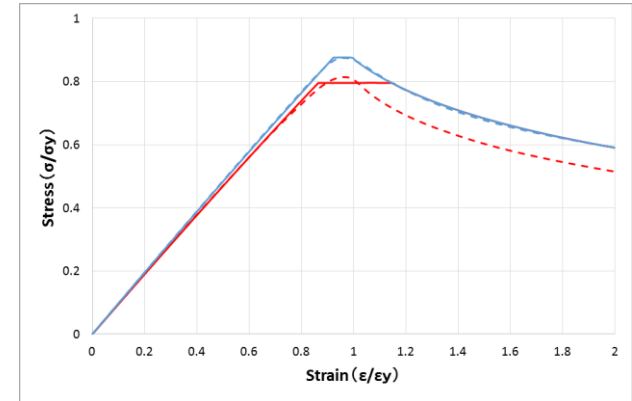
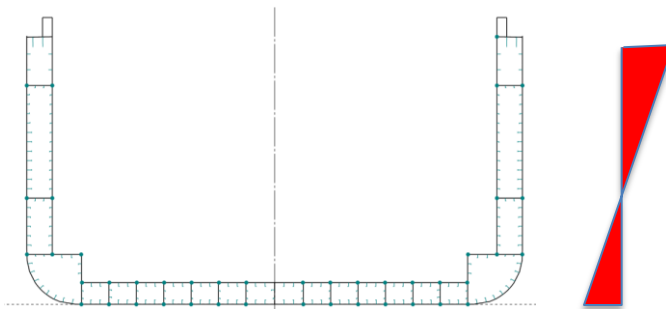
両簡易手法の精度を検討

簡易評価法① 拡張Smith法

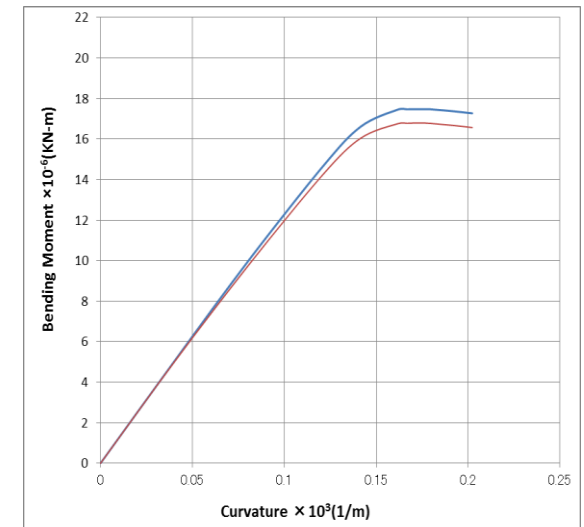
- ① 水圧及び船幅方向応力の影響を考慮した防撓パネルの船長方向応力-ひずみ関係を求める。



- ② 横断面が一定の曲率で曲げ変形を起こすという仮定より、モーメント-曲率関係を導く。



応力-ひずみ関係



モーメント-曲率関係

計算手順

Step1

FEM又は推定式により、応力状態を算定し、船体断面に付与

Step2

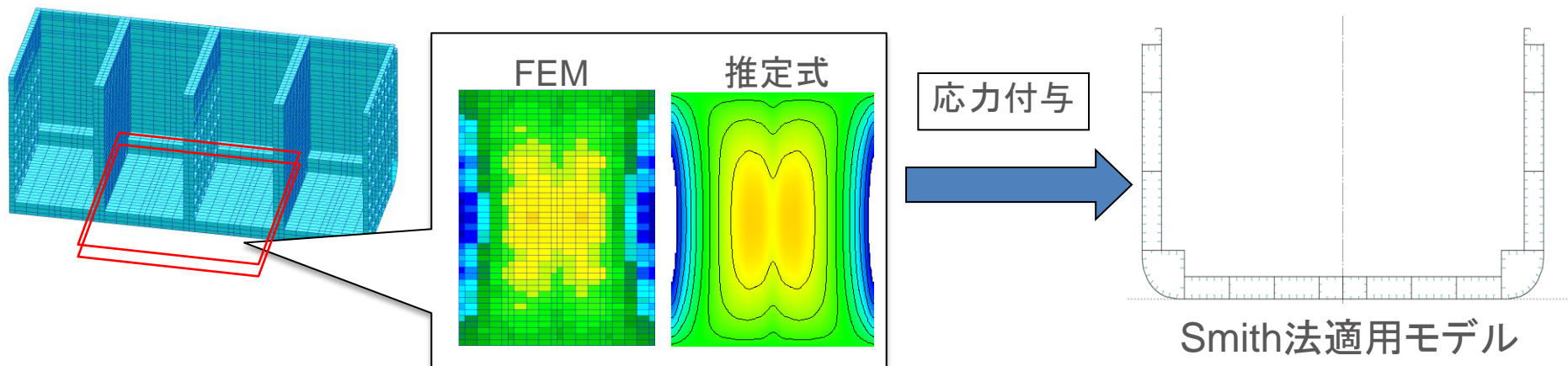
防撓パネルの応力 - ひずみ関係を、改良版Gordoの式又はOUVを用いて算定

Step3

Smith法から、縦曲げ最終強度を算定

対象モデル

8000TEUのコンテナ船3隻: ShipA~C

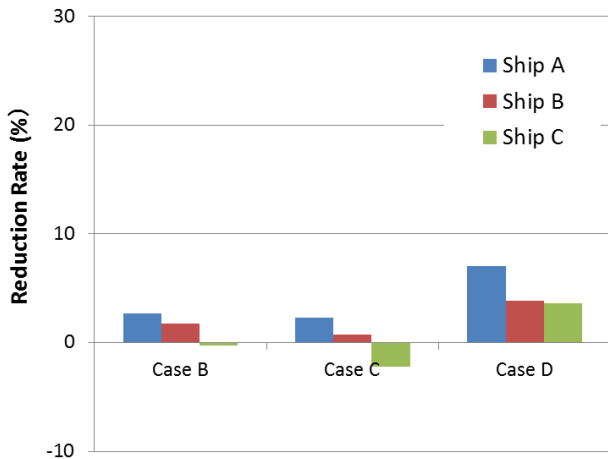


試算結果

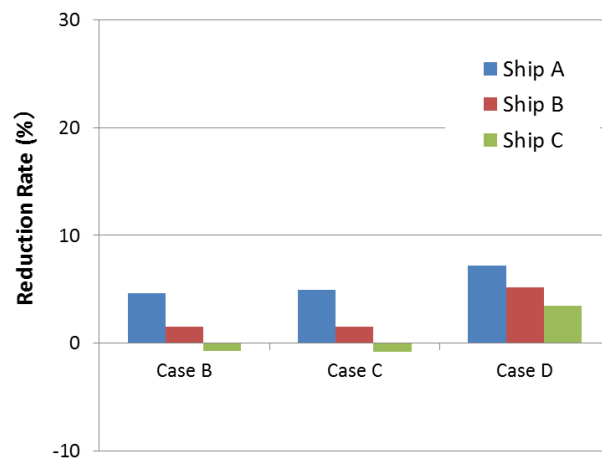
- Case A 純曲げ(=ローカル荷重を考慮しない)
- Case B 求めた初期応力を船体横断面全てに付与
- Case C 求めた初期応力を二重底に付与
- Case D 求めた初期応力を、ビルジ部をのぞく船底外板に付与

Case Aに対するCase B~Dでの縦曲げ最終強度の低下率

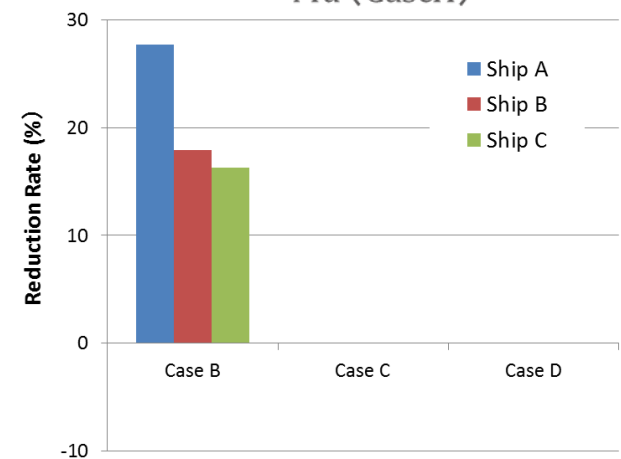
$$1 - \frac{\text{Mu}(\text{CaseB~D})}{\text{Mu}(\text{CaseA})} (\%)$$



改良版Gordoの式



OUV



ホールド弾塑性解析

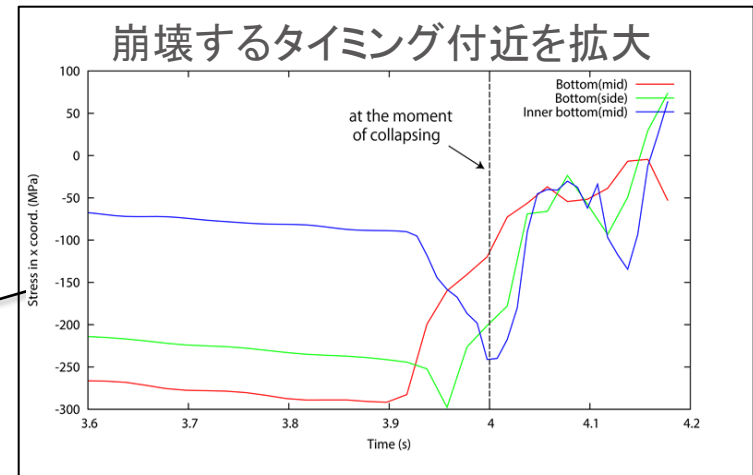
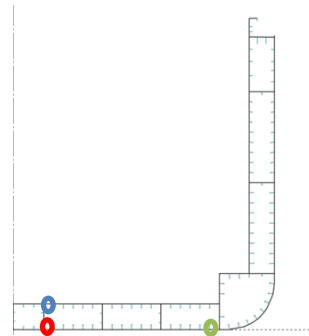
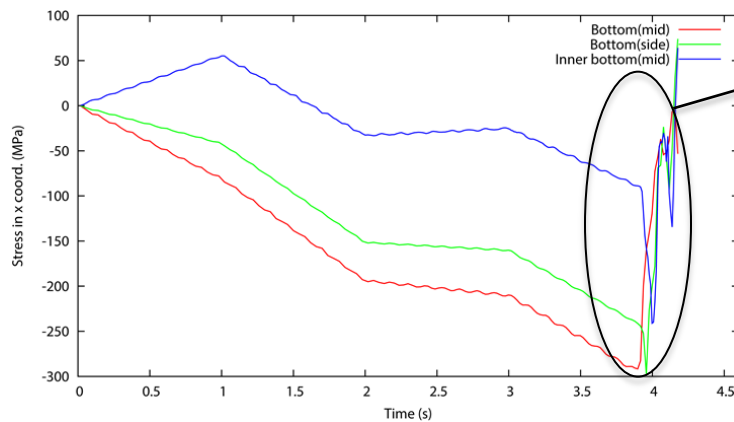
本評価法では、縦曲げ最終強度へのローカル荷重による影響を再現することが出来ない。
 →実際には、断面全体が一様の曲率で曲げ変形するというSmith手法の仮定とは異なる応答が生じていると考えられる。

簡易評価法② 船底外板の平均最終強度に基づく簡易評価法

3ホールド弾塑性解析により、崩壊断面の二重底における3箇所の船長方向応力を調査

- 1: 船底外板中央部のパネル
- 2: 船底外板のビルジ側のパネル
- 3: 内底板中央部のパネル

σ_x の推移



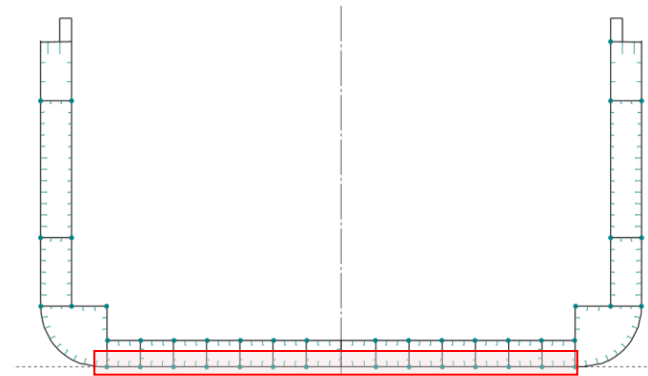
船底外板の崩壊から、全体崩壊までの
のモーメントの差は非常に小さい。

船底が崩壊した段階で、ほぼ全体崩壊に近い状態となるという特徴を示している。
→船底外板の平均最終強度に対応した縦曲げモーメントを縦曲げ最終強度と考えても、
それほど差異は生じないと考えられる。

計算手順

- ① 水圧及び船幅方向応力を受ける船底外板防撓パネルの船長方向の最終強度 σ_{us} を導く。
- ② 船底外板の防撓パネル最終強度の面積平均を求める。

$$\sigma_{us-avg} = \frac{\sum_i A_i \sigma_{usi}}{\sum_i A_i}$$



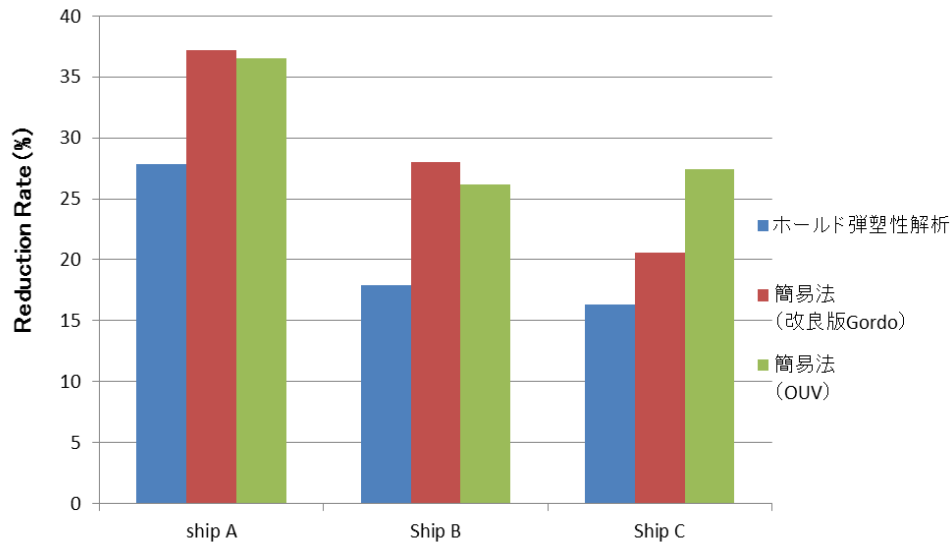
- ③ 船底外板の断面係数を乗じることで、ホギング側の縦曲げ最終強度を導く。

$$M_{us-hog} = \sigma_{us-avg} Z_{btm}$$

試算結果

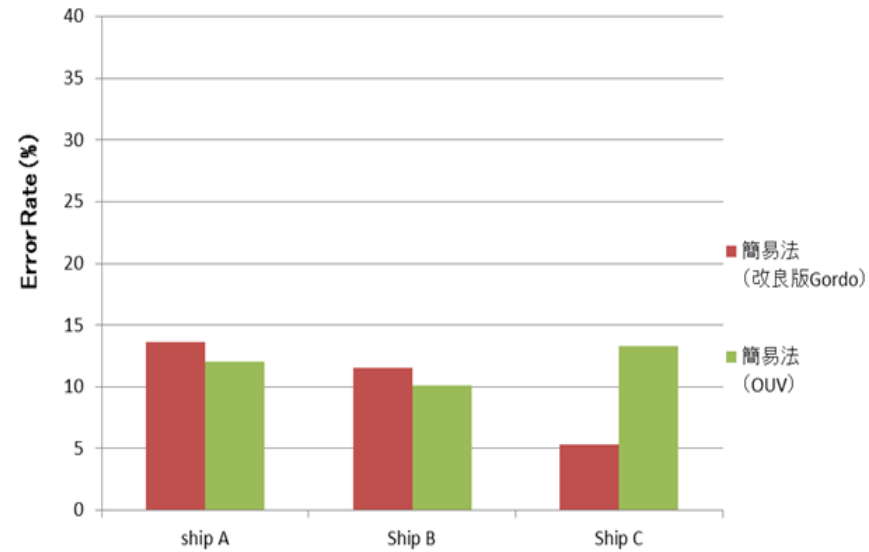
評価法毎の縦曲げ最終強度のローカル荷重による低下率

$$1 - \frac{\text{Mu (FEM or 簡易手法)}}{\text{Mu(FEM) (ローカル荷重なし)}} (\%)$$



簡易法によって推定した縦曲げ最終強度のFEMとの誤差

$$1 - \frac{\text{Mu(簡易手法)}}{\text{Mu(FEM)}} (\%)$$



※ Mu: ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度

OUV算式を用いた簡易法はFEMとの誤差は一割程度であり、係数の調整等で精度良い推定が行える可能性がある。

総括及び今後の課題

- Smith法の拡張による、ローカル荷重を考慮した縦曲げ最終強度はホールド弾塑性解析により求めた値とは異なる値となった。
 - 断面全体が一様の曲率で曲げ変形するというSmith手法の仮定とは異なる応答が、実際には生じていることが原因であることが明らかになった。
 - モーメントの増加に伴い二重底曲げが増大することを考慮したモデルを取り入れ、改良を行ったSmith手法の開発を進める必要がある。
- 船底外板の平均最終強度に基づく簡易評価法は、一定の精度を有することを確認した。
 - ローカル荷重が働く場合の崩壊挙動は、船底が崩壊した段階で、ほぼ全体崩壊に近い状態になるという特徴による。
 - 試計算船を増やし、精度及び適用性についての検証を進める必要がある。

8. まとめ

本共同研究結果

水圧及び船幅方向応力が働く際の防撓パネルの軸方向応力－ひずみ関係の推定法

- Gordo-Soaresの簡易式において二軸圧縮における弾性座屈相関式から船幅方向応力影響を考慮する方法を示した。
- 水圧及び船幅方向応力の影響を考慮した防撓パネルの平均応力－平均ひずみ関係を推定できる新たな手法を開発した。

→更なる精度向上を目指す。(大阪大学)

二重底構造に発生する応力の推定法

- 二重底を異方性板と見なし、エネルギー法により船底外板及び内底板の応力分布を求める推定プログラムを作成した。
- NK規則取り入れを目指し、推定プログラムを基とした、簡易算式を作成した。

→推定に必要なパラメータが多く、式も複雑なため、引き続き簡略化を行っていく。(NMRI)

ローカル荷重が働く際の縦曲げ最終強度の推定

- 拡張Smith手法に基づく簡易評価法を提案し、より精度を高めるためには、横断面と独立して二重底が変形することを考慮すべきであることを示した。
- ローカル荷重影響を考慮した船底外板の平均最終強度を用いた簡易法を提案し、本手法は、一定の精度を有することを確認した。

→精度、簡便さ及び適用性の向上のため、改良を行った上で適切な評価手法を選定する。
(NK)

本共同研究にて得られた成果を活用し、今後、NK規則への取り入れに向けて、各評価法の更なる精度向上及び検証を進めていく。

THANK YOU

for your kind attention

