

基礎研究

防撓材不連続箇所に対する経験則への技術的根拠の付与

日本貴 秀一*
Shuichi Yamatoki



有松 征太郎**
Seitaro Arimatsu



後藤 浩二***
Koji Gotoh



船体構造設計時に発生する防撓材の不連続箇所において、規則計算では想定していないモーメントによる高応力を最小限に留めるため、不連続量を一定以上に拡げる処置を取ることが一般的である。この量は経験的に決められており、これまで定性的・定量的に検討された研究成果や基準は公表されていない。そこで本研究では経験則の技術的根拠を追及するため、不連続モデルを用いたFE解析を実施し、応力分布に及ぼす影響を確認した。その結果、不連続量がある一定量以上増加させることで応力が収束することが判明し、防撓材から防撓されている板へ荷重が流入することが原因であることを確認した。また、荷重様式や板厚の変化が応力値に影響を及ぼすことも明らかになり、今後の構造設計に有用な知見を得ることができた。最後に、研究成果を設計に反映する際に考慮すべき点も検討した。

1. 緒言

船体構造設計時に開口や機器配置等を考慮し部材配置を行うと、大骨位置にて防撓材同士の取り付け位置が一致しない場合がある。例として、第1図に縦強度部材として連続性を要求される範囲外のロンジとトランスの接合部を挙げる。本研究では、この取り付け位置がずれる量を不連続量と呼び d で表す。不連続部にはモーメントが発生し、規則計算では想定していない応力が付加される。そこで影響を最小限に留めるため、連続性を保てない場合は、逆に不連続量を一定以上に拡げる設計を行うことが一般的である。この量は経験的に100mm程度が妥当だと船殻設計者の間でも見なされているが、これまで定性的・定量的に検討された研究成果や設計基準は公表されていない。よって、この量の技術的裏付けを問われた場合には回答できないばかりか、設計変更を求められる可能性もある。また、弊社実績船では損傷事例は報告されていないものの、一般的に損傷事例が皆無という訳ではないと聞く。従って、顧客満足度向上と安全性向上の観点から不連続影響の評価が望まれる。

不連続部と類似する構造として、船体建造時の精度誤差によって発生する目違いが挙げられる。目違いについては、

JSQS¹⁾やCSR-B²⁾、IACS Rec. 47³⁾、IIW溶接構造の疲労設計指針⁴⁾等において、目違い基準や目違いによる応力上昇率の推定式が提案されている。第2図にIIW指針の推定式、第3図にその推定結果を示す。推定式の計算には、第2章で示す解析モデル寸法を用いた。これは軸力を考慮した材料力学モデルを基に作成されているが、実構造においては軸力以外の荷重様式も作用することや、継手を構成する部材の板厚が一定でないこと等が基準値に影響を及ぼすことが想定される。また、推定式は目違い量 e の一次式となっているため、第3図に示すように目違い許容値範囲を大きく超える不連続構造に対しては値が右肩上がりとなり、そもそも適用が想定されていないと考えられる。これに対し著者らは、材料力学モデルを基に不連続範囲でも適用可能な推定式を提案した(第4図)⁵⁾。それによって、不連続量の増加に伴い値が収束する様子を表現できるようになったが、実構造への適用に対してはまだ課題も多い。

本研究では、不連続部を模擬した十字溶接継手モデルにてFE解析を実施し、高応力発生を避けるために不連続量を拡大するという経験則の技術的根拠を追及する。加えて、荷重様式・板厚の違いによる影響も確認する。さらにその

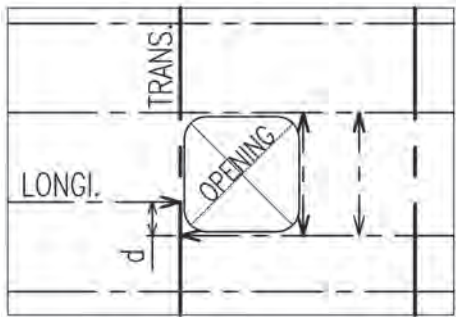
原稿受理日：July 31, 2013

*株式会社名村造船所 船舶海洋事業部 設計本部 基本設計部 船殻設計課

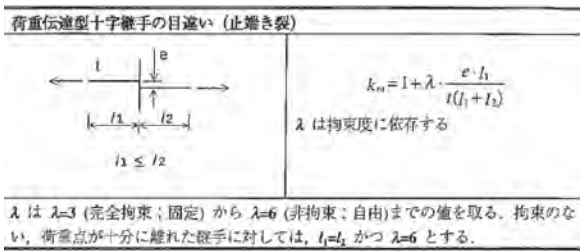
**株式会社名村造船所 船舶海洋事業部 生産管理部 生産計画課

***九州大学大学院工学研究院

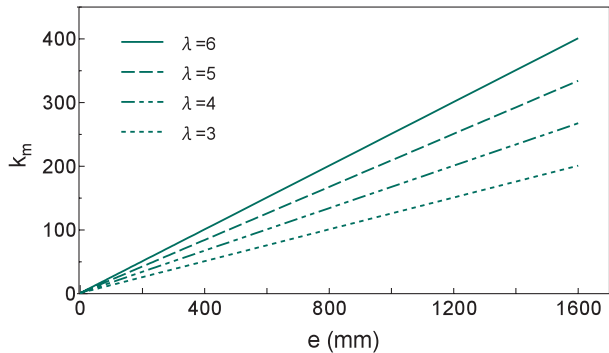
結果を設計に反映する際に考慮すべき点についてまとめる。



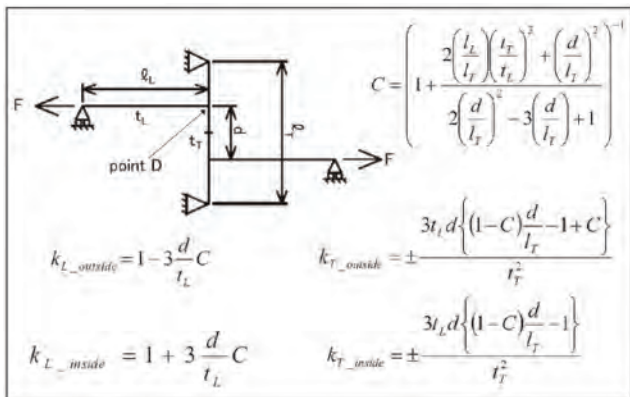
第1図 防撓材不連続部の例



第2図 IIW 指針の応力上昇率の推定式



第3図 IIW 指針の応力上昇率の推定式の結果



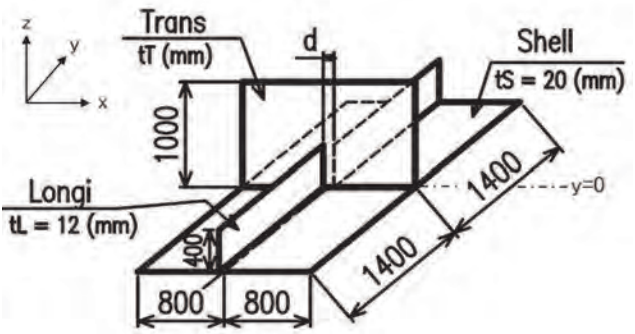
第4図 不連続構造における応力変化率の推定式

2. 解析条件

本研究で実施した FE 解析には汎用解析コード MSC Nastran 2011⁶⁾を使用した。最少メッシュサイズは、1mm x 1mm であり、解析にはシェル要素を用いた。なお、著者らは同じモデルにてシェル要素とソリッド要素を用いた解析を比較検討し、不連続量 d が小さい場合でもシェル要素を用いた解析が妥当であることを示している⁵⁾。

2. 1 解析モデル

解析モデルを第5図に示す。これは、船側外板にロンジを取り付けた部分を模擬しており、モデル中の部材名を「ロンジ」、「トランス」、「シェル」と名付ける。モデルの変数は、第1表に示す。ロンジ板厚に対するトランス板厚の比を β とし(1)式で示す。ロンジ板厚は全解析において、実船での適用実績を考慮して 12mm とした。また境界条件を第6図に示す

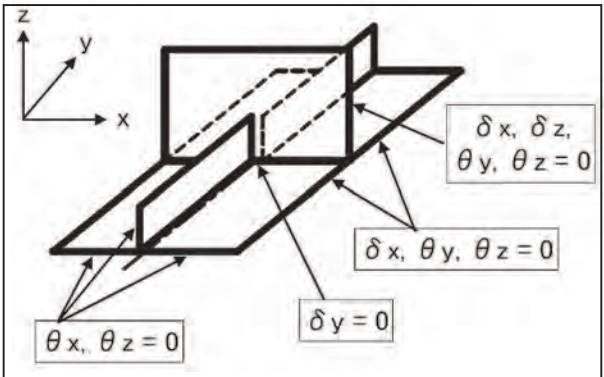


第5図 解析モデル

第1表 モデル変数

β (tr)	0.7 (8)	1.0 (12)	1.3 (16)	1.7 (20)	
d (mm)	0	4	6	12	24
	50	100	150	200	

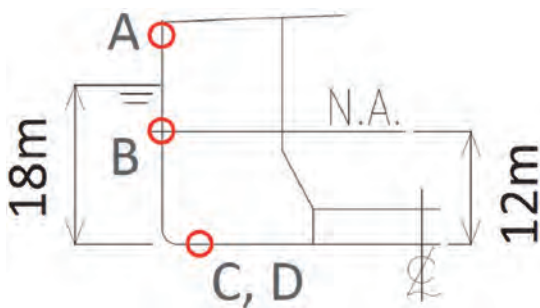
$$\beta = t_T / t_L \quad (1)$$



第6図 境界条件

2. 2 荷重ケース

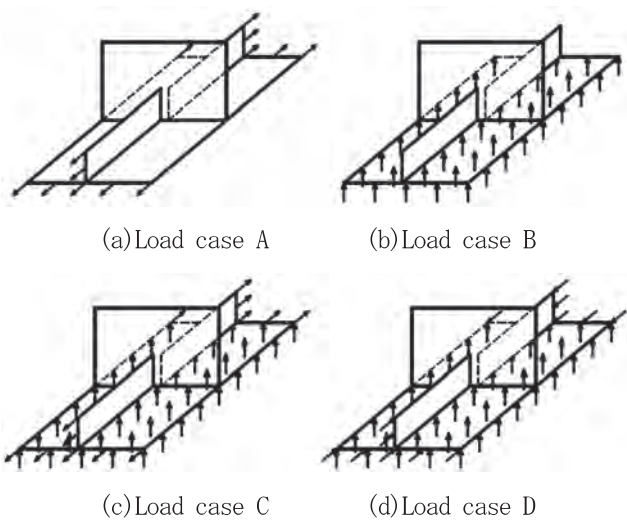
荷重ケースは、船体縦曲げモーメントによる軸力と海水圧による分布荷重の二つを想定する. 第7図 に示す様な船体中央断面を持つ船において、軸力のみが作用する箇所を点A、水圧のみが作用する箇所を点B、軸力と水圧が同時に作用する箇所を点CとD (CとDは軸力の符号が異なる) とし、それぞれの値をLoad case A, B, C, Dとし第2表 に示す. 軸力はNK 規則⁷⁾ で規定される KA36 鋼 の許容応力から決定した. 水圧は各点の喫水に対応する値とした. 軸力と水圧が作用する様子を第8図に図解する.



第7図 中央横断面図

第2表 荷重ケース

Load case	Axial Load (N/mm ²)	Lateral Pressure (N/mm ²)
A	243	0
B	0	0.06
C	243	0.18
D	-243	0.18



第8図 作用荷重

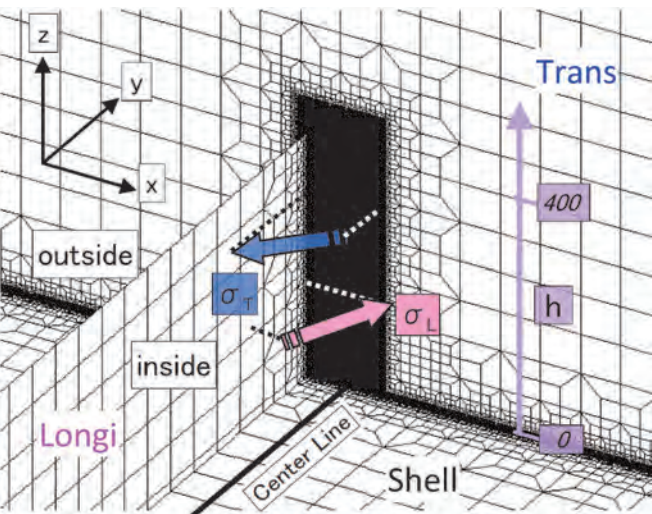
2. 3 不連続影響係数の定義

本研究では、式(2)と(3)に定義する「不連続影響係数」を用いて評価を行う. これらは不連続が発生していない場合の応力 ($\beta=1.0$) に対し、任意の不連続量が存在する場合の応力の比を示す. 不連続影響係数はIIW 指針で提案されている応力上昇率の推定式と類似したものであるが、i) 係数の符号がマイナス(-)になる場合があること、ii) ロンジとトランスの両方の応力に対応した式が存在する2点が異なる. 符号は(+)が引張応力、(-)が圧縮応力に対応する.

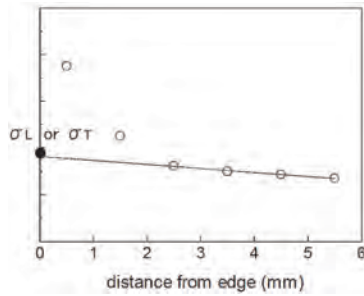
$$k_L = \sigma_L / \max|\sigma_{L_d=0_ \beta=1.0}| \tag{2}$$

$$k_T = \sigma_T / \max|\sigma_{L_d=0_ \beta=1.0}| \tag{3}$$

σ_L はロンジ応力の y 方向成分、 σ_T はトランス応力の x 方向成分で、応力の方向は第9図に示す. 両応力は第10図に模式的に示す様に、ホットスポット応力算定手順と同様、他部材との接合部近傍で応力値が急変する部分を除いた応力分布を線形近似し、これを他部材との接合部まで外挿して得られる値として与える. (2)及び(3)式の分母は、不連続が発生していない時の σ_L の最大値であるが、ロンジ上部 ($h = 400 \text{ mm}$) 付近の構造的応力集中部を除く範囲から求めた. また、モデルの内側・外側の定義と、ロンジの高さを示す h 座標は第9図に示す通りとする.



第9図 評価応力の定義



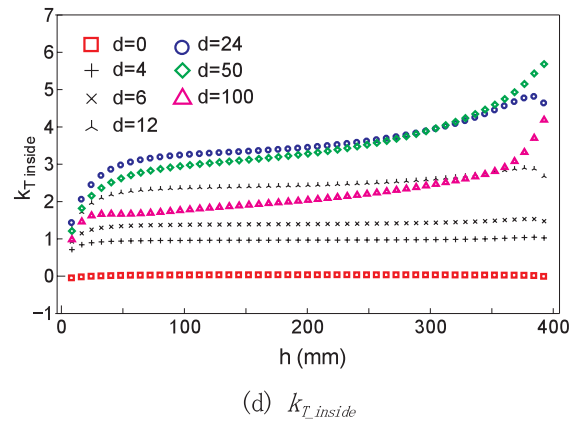
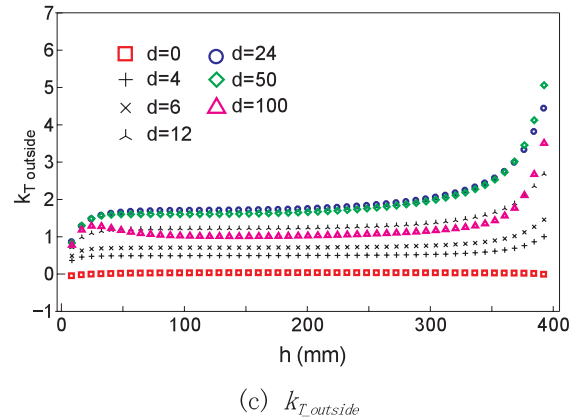
第10図 ロンジ応力及びトランス応力の同定方法

3. 不連続影響係数の変化

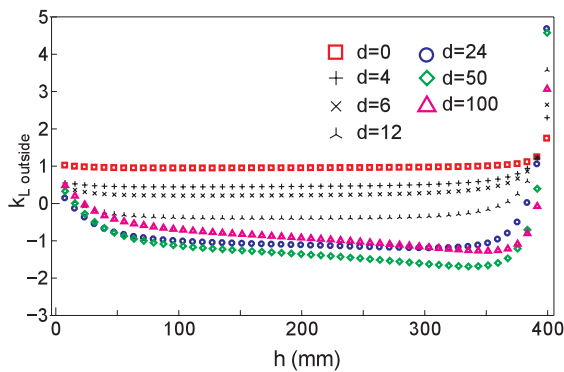
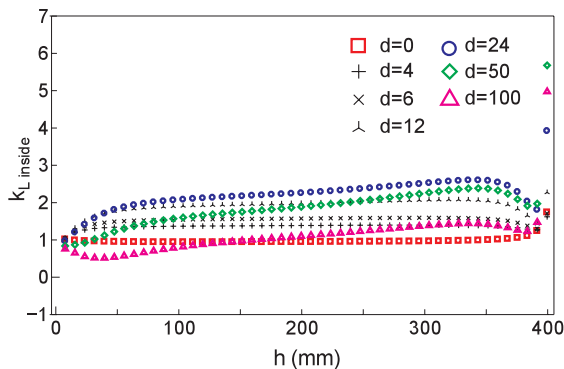
本章では、FE 解析結果から算出した不連続影響係数を評価する。

3. 1 不連続影響係数の変化 (Load case A)

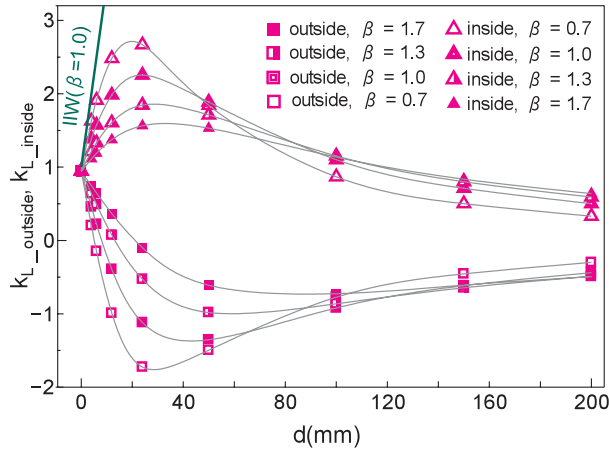
本節では、Load case A の時の不連続影響係数の変化を評価する。第11図に $\beta=1.0$ の時の $k_{L_outside}$, k_{L_inside} , $k_{T_outside}$, k_{T_inside} の不連続量 d による変化をロンジ高さ位置 h を横軸として示す。見易くするため、 $d = 150 \text{ mm}$ と $d = 200 \text{ mm}$ の結果は除いた。 d が大きくなるにつれ係数の変化も大きくなるが、 $d = 24 \text{ mm}$ もしくは $d = 50 \text{ mm}$ で変化が減少に転ずることが確認できる。その原因は後述する。また、全体的に k_T の変化の方が k_L のそれより大きいことが判明した。



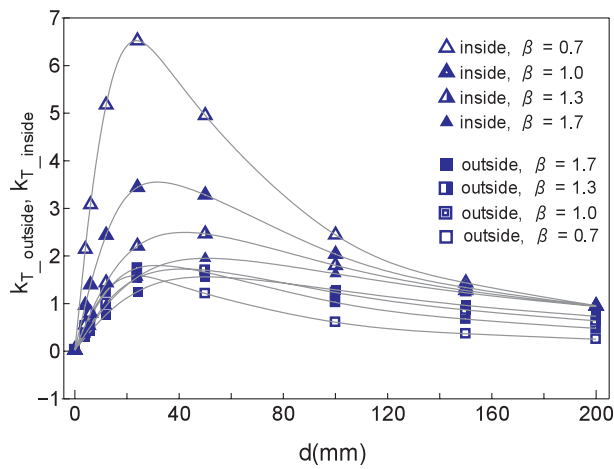
第11図 不連続影響係数の変化
($\beta=1.0$ / Load case A)

(a) $k_{L_outside}$ (b) k_{L_inside}

不連続量 d の不連続影響係数に及ぼす変化をより詳細に検討するため、複数の β の値においてロンジ高さ $h = 200 \text{ mm}$ での各係数の変化を第12図に示す。その結果、係数は単調増加しておらず極値を有しており、不連続量 d をある一定量以上増加させることで係数が収束する傾向が確認された。これが、不連続量を広げることで高応力を避けるべきという経験則に対応した結果であると考えられる。また、 β が大きい場合に係数の変化が抑えられることも判明した。以上の結果からトランス板厚の増厚と不連続量の適切に設定することで接合部近傍における極端な応力変化を抑えることが可能であると考えられる。



(a) $k_{L_outside}$ & k_{L_inside}



(b) $k_{T_outside}$ & k_{T_inside}

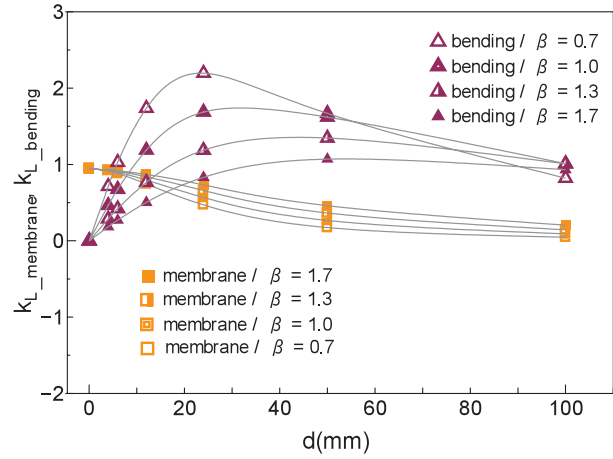
第12図 不連続影響係数の変化

($h = 200 \text{ mm}$ / Load case A)

次に、不連続量 d をある一定量以上大きくすることで応力変化が抑えられる理由を調査するため、式(4)、(5)に示すように係数を膜応力成分と曲げ応力成分に分け、これらの値の不連続量 d 、板厚比 β に対する変化を調べた。その結果を第13図に示す。第13図に示す結果から、 d の増加に応じて膜応力成分が減少することが判明した。曲げ応力成分は膜応力成分と不連続量の積の形を取るため、曲げ応力成分が極値を持つ変化となる原因の一つが、膜応力成分の減少であると考えられる。

$$k_{\text{membrane}} = (k_{\text{inside}} + k_{\text{outside}}) / 2 \quad (4)$$

$$k_{\text{bending}} = (k_{\text{inside}} - k_{\text{outside}}) / 2 \quad (5)$$



第13図 不連続影響係数 k_L の膜・曲げ応力成分変化

($h = 200 \text{ mm}$ / Load case A)

また、膜応力成分の減少の原因について調査するため、荷重伝達率を検討する。荷重伝達率は R で示し、解析結果を基に(6)～(10)式によって求めた値で、解析モデル(第5図)の $y=0$ におけるロンジとシェルに伝達されている荷重の荷重全体に対する比である。なお、 σ_y には曲げ応力成分を取り除いた膜応力成分を採用した。その結果を第14図に示すが、 d が大きくなるにつれロンジの荷重伝達率が減少し、代わりにシェルの荷重伝達率が増加することが判明した。従って、 d の増加によってロンジの荷重がシェルに流れる傾向にあることが確認され、これが第13図の膜応力成分の減少の原因であり、 d を大きくすることで応力が収束する原因であると判断できる。

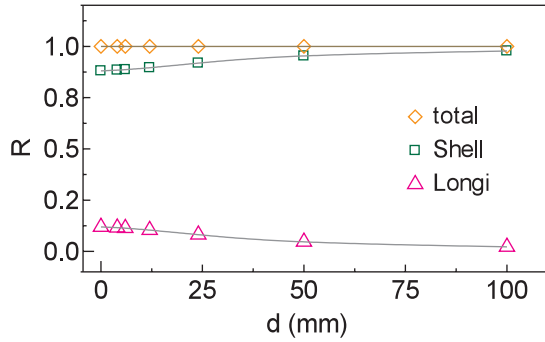
$$F_{L_y=0} = \int_0^{400} \sigma_{y(z)_L} t_L dz \quad (6)$$

$$F_{S_y=0} = \int_{-800}^{800} \sigma_{y(x)_S} t_S dx \quad (7)$$

$$R_L = F_{L_y=0} / (F_{L_y=0} + F_{S_y=0}) \quad (8)$$

$$R_S = F_{S_y=0} / (F_{L_y=0} + F_{S_y=0}) \quad (9)$$

$$R_{\text{Total}} = R_L + R_S \quad (10)$$

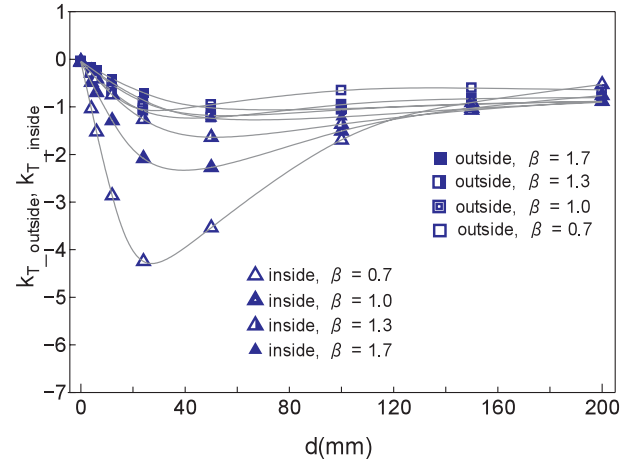


第 14 図 荷重伝達率

3. 2 不連続影響係数の変化 (Load case B)

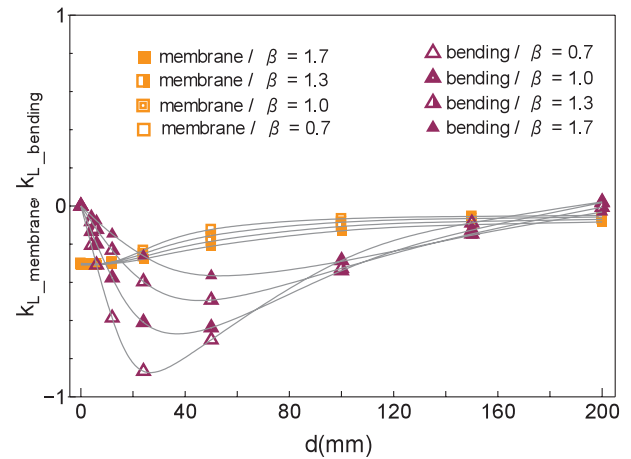
本節では Load case B の解析結果を示す。第 15 図に $h = 200$ mm での係数の変化を示す。Load case A と同様、極値を有する変化を示すこと、 β を大きくすれば変化が抑制されること、 k_{T_inside} の変化が他の係数のそれよりも大きくなることが判明した。ただしその変化自体は Load case B の方が小さい。

k_L の膜応力成分と曲げ応力成分を第 16 図に示す。Load case A の場合と同様に膜応力成分の絶対値が減少している。しかし、その原因は Load case A とは異なると考えられる。Load case B では軸力を作用させていないため、ロンジに発生する曲げ応力によってのみ膜応力成分が生じる。不連続が発生していない場合はトランス側のロンジ端部は固定端と見なすことができるが、不連続量が増加するにつれて自由端に類似した挙動を示す。そのため端部での曲げ応力が減少し、結果として膜応力成分が減少することになる。

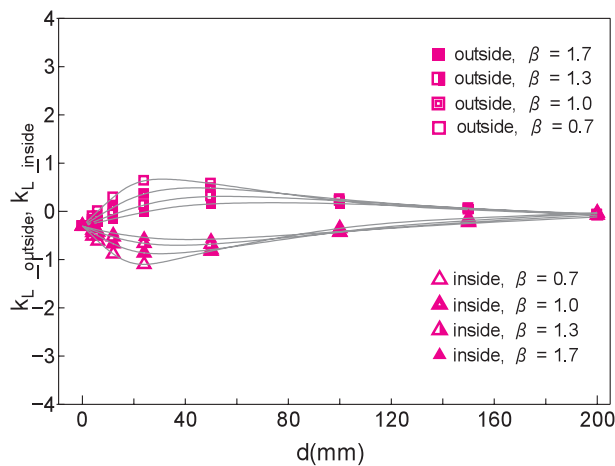

 (b) $k_{T_outside}$ & k_{T_inside}

第 15 図 不連続影響係数の変化

($h = 200$ mm / Load case B)


 第 16 図 不連続影響係数 k_L の膜・曲げ応力成分変化

($h = 200$ mm / Load case B)


 (a) $k_{L_outside}$ & k_{L_inside}

3. 3 不連続影響係数の変化 (Load case C & D)

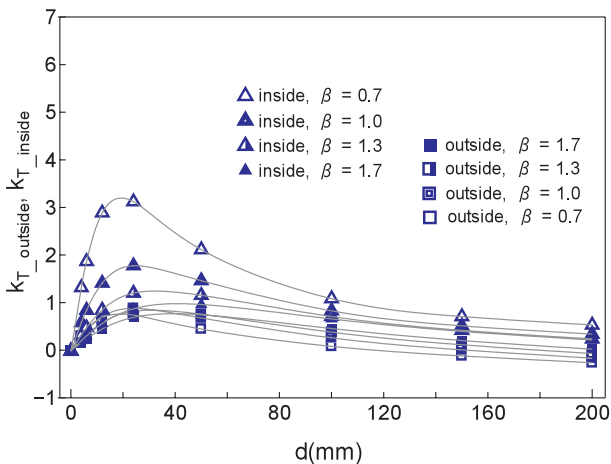
本節では、Load case C と D に関して評価を行う。本研究では、Load case C においては FE 解析を実施し、Load case D に対しては FE 解析を実施していないことを述べておく。

これまでに k_T の変化の方が k_L のものより大きいことが判明しているので、まず Load case C の解析結果から k_T の変化のみを第 17 図に示す。Load case A の結果 (第 12 図) と比較すると、変化が抑えられていることが確認できる。これは、軸力と水圧の作用する向きが異なり、相殺する効果が働くことが原因であると考えられる。

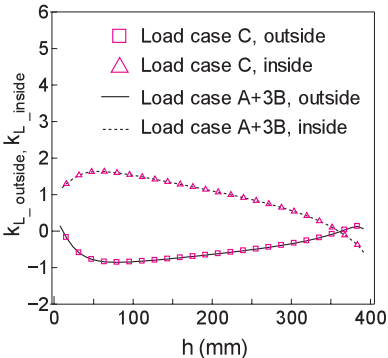
次に Load case D の変化を確認するため、Load case の重ね合わせについて検討する。第 18 図に $\beta=1.0$, $d=24$ mm の時の Load case C の解析結果から得られた不連続影響係数と、Load case A, B の解析結果から得られた値を第 2 表

より A+3B を計算した結果の比較結果を示す。両者は完全に一致していることが確認できる。よって、軸力と水圧が同時に作用する荷重ケースにおいては、それぞれの解析結果を重ね合わせることによって、推定が可能である。

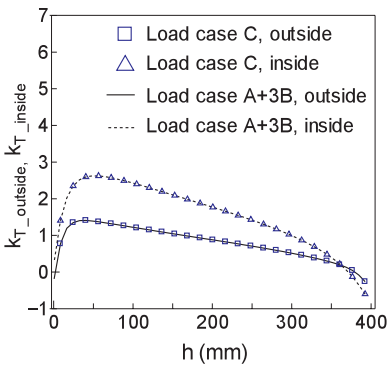
そこで、重ね合わせを実施し解析を行っていない Load case D の k_T の変化を第 19 図に示す。その結果、変化が最も大きい荷重ケースとなることが確認された。これは、Load case C の場合と逆に、軸力と水圧が重畳したことが原因と考えられる。従って、設計を行う際には Load case D 時の発生応力を想定する必要がある。そこで、第 20 図に Load case D の k_{T_inside} と Load case A のそれに対する比を示す。 k_{T_inside} のみを評価するのは、不連続影響係数の中で変化が最大となるからである。その結果、Load case D は A に対し、1.6 倍程度の値が発生していることが確認された。従って、今後は Load case A の結果に対して安全率 1.6 程度を考慮することで、安全性を持った設計を行うことができると考えられる。この値は第 7 図に示す船型と第 2 表の荷重条件下での検討結果であるが、ほとんどの弊社建造船に対しては安全側に適用することが可能と考えられる。



第 17 図 不連続影響係数(k_T)の変化
($h = 200 \text{ mm}$ / Load case C)

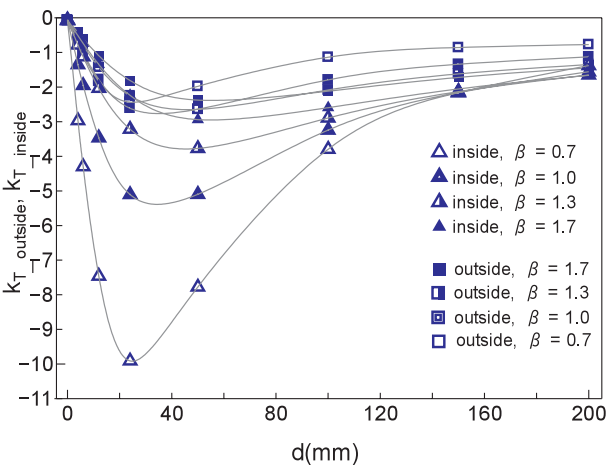


(a) $k_{T_outside}$ & k_{T_inside}

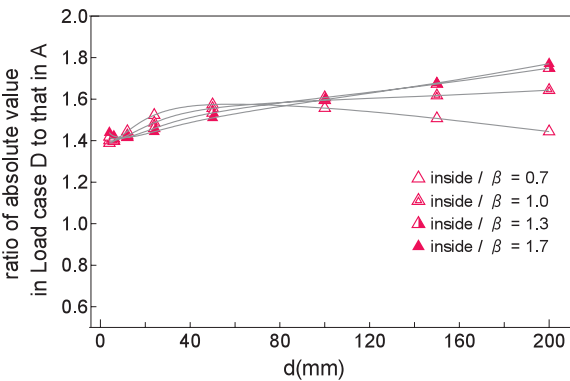


(b) $k_{T_outside}$ & k_{T_inside}

第 18 図 重ね合わせ結果との比較
($\beta=1.0$ / $d = 24 \text{ mm}$)



第 19 図 不連続影響係数(k_T)の変化
($h = 200 \text{ mm}$ / Load case D)



第 20 図 Load case D と A の比 ($k_{T_inside} / h = 200 \text{ mm}$)

4. 今後の設計に関して

本研究の成果として、いくつかの有用な知見が得られた。これらを基に今後の設計に活かしていきたいと考えているが、いくつか注意すべき問題・課題がある。

まず、本研究では不連続影響係数という無次元値を取り

扱っているが、実設計への反映においては実績を加味した上で過度に安全側となる構造へシフトすることは避けるべきである。安全性と実績のバランスを十分に考慮する必要があると考えられる。

次に、本研究の解析モデルはシンプルなものであるため、ロンジのフェイスやブラケット等の影響を確認する必要がある。これらによって傾向が変化することも考え得るので、追加検討として今後の課題としたい。

最後に、設計への反映方法については設計標準化を行うことが一般的であるが、板厚によって応力が変化するような事実を標準化する場合、使用条件が煩雑になることも予想される。使い勝手を優先して板厚影響を無視し安全側に基準を設定すれば重量増等のデメリットとなる。よって、標準化自体の是非も含め設計への反映方法については検討する必要がある。

5. 結言

本研究では、経験則の技術的根拠を追及するため、不連続モデルを対象にFE解析を実施した。また、不連続による応力変化率として定義した不連続影響係数の変化や、それに対する荷重様式や部材板厚の影響も検討した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 不連続量をある一定量以上大きくすることで、応力が収束する傾向があることが判明し、その原因としてロンジ荷重が外板に流れることを示した。これが経験則の技術的根拠になると考えられる。
- 2) ロンジよりもトランスに高応力が発生することが判明した。
- 3) トランス板厚の変化により応力値も変化し、板厚増加によって応力変化が抑えられる可能性を示した。
- 4) 弊社建造船においては、軸力作用時の解析結果に対し1.6倍程度の安全率を設定すれば、水圧重畳時を考慮した安全側の設計が行えることを示した。
- 5) 本研究成果を設計に反映する際に考慮すべき点・今後の課題を明記した。

参考文献

- 1) (公社)日本船舶海洋工学会 工作分野研究企画部会：JSQS 日本鋼船工作法精度標準 船殻関係, 2010
- 2) International Association of Classification Societies: Common Structural Rules for Bulk Carriers, 2012

- 3) International Association of Classification Societies: Rec.47 Shipbuilding and Repair Quality Standard(Rev.6), 2012
- 4) International Institute of Welding: Fatigue design of welded joints and components, 1996, 社団法人 溶接学会 溶接疲労強度研究委員会 訳
- 5) S. Yamatoki, S. Arimatsu, K. Gotoh: Misalignment Effect on a Three-Dimensional Cruciform Welded Joint, OMAE, 2013
- 6) エムエスシーソフトウェア株式会社ホームページ:MSC Nastran 2011, <http://www.mssoftware.co.jp/>
- 7) Class NK: Guidance for the Survey and Construction of Steel Ships, 2012, Part C C30

記号表

d	不連続量 (mm)
e	IIW 疲労設計指針に定義されている目違い量 (mm)
km	IIW 疲労設計指針に定義されている応力上昇率
t_L	ロンジ板厚 (mm)
t_T	トランス板厚 (mm)
t_S	シェルの板厚 (mm)
β	t_L に対する t_T の比 ((1)式に定義)
x, y, z	第5図に示す解析モデルの x, y, z 座標
h	第9図に示すロンジの高さを示す座標 (mm)
σ_L	ロンジ応力の y 方向成分 (N/mm^2)
σ_T	トランス応力の x 方向成分 (N/mm^2)
k_L	ロンジ応力に対する不連続影響係数 ((2)式に定義)
k_T	トランス応力に対する不連続影響係数 ((3)式に定義)
$k_{outside}$	外側 (第9図に示す) の不連続影響係数
k_{inside}	内側 (第9図に示す) の不連続影響係数
$k_{membrane}$	不連続影響係数の膜応力成分
$k_{bending}$	不連続影響係数の曲げ応力成分
F_L	ロンジが受け持つ荷重 (N) ((6)式に定義)
F_S	シェルが受け持つ荷重 (N) ((7)式に定義)
R_L	ロンジの荷重伝達率 ((8)式に定義)
R_S	シェルの荷重伝達率 ((9)式に定義)
R_{Total}	ロンジとシェルの荷重伝達率の合計値 ((10)式に定義)