KC#291

ナックル部の応力集中係数
(スツール構造、ビルジホッパ構造等)

1. 基本SCF

板と板との交差部における板表面における応力分布は、Williams の解(R.William and Soutas-Little, □Elasticity□, Dover publishing, 1998)を用いて、ナックル点からの距離 r に応じて次式で与えられる。

$$\sigma_r = \frac{A'}{r^{\lambda-2}} \tag{1}$$

ここで、 r ；ナックル点から評価点までの距離

$\lambda-2$ ；特異点の強さを表すパラメーターで、交差角θに応じて変化する

A' ；係数

$(\lambda-2)$ は数学上の特異点の強さをあらわすパラメーターであるが、この値について、θが30°以上90°までの範囲で近似算式を当て嵌めると以下の様になる。また、$(\lambda-2)$ に対する厳密解と近似算式からの値を示すと表1のようである。

$$\lambda-2 = 0.2 + 0.0028\theta \tag{2}$$

表１　厳密解と近似算式との比較

θ (deg.)	$\lambda-2$	$0.2+0.0028\theta$
90	0.4556	0.4520
75	0.4261	0.4100
60	0.3840	0.3680
45	0.3265	0.3260
30	0.2480	0.2840
20	0.1813	0.2560

(1)式から与えられる値は、$r > 300 \sim 500\ mm$ で一定値に漸近するので、漸近値を公称応力とすると以下のように応力集中係数を定義する事ができる。

$$\sigma_r = \frac{A'}{r^{\lambda-2}} = \sigma_n \frac{A}{r^{\lambda-2}} = K_0 \sigma_n \qquad \left[K_0 \equiv \frac{A}{r^{\lambda-2}} \right] \tag{3}$$

ナックル部等の公称応力σ_nは、ロンジスペース程度で要素分割した Hold Model による FE 計算から求めることができる。

(3)式のように定義される応力集中係数を一般化するに当り、ナックル点からの距離に依存しない係数Aについては、Williams による解と有限要素解との比をナックル部周辺について求め、それらの平均値から設定する事とする。即ち、次式から求めるものとする。

$$A(r) = \frac{\sigma_{FEM}(r)}{\sigma_r} = r^{\lambda-2}\frac{\sigma_{FEM}(r)}{\sigma_0} \tag{4}$$

バルクキャリヤのスツール部とビルジホッパー部、DH タンカーのビルジナックル部について、(4)式により求まる値の平均値を示すと図 2 のようである。係数 A の値の平均はナックル角依存性が強いので、ナックル角をパラメーターとして近似式を与えると以下のようになる。

$$\overline{A} = 0.14\,\theta\cdot(1.15 - 0.0033\,\theta) \tag{5}$$

一方、応力集中係数は、ナックル部近傍を板厚程度の要素でモデル化して計算されるホットスポット応力と公称応力との比で求められる。

$$K_0 \equiv \frac{\sigma_{hotspot}}{\sigma_n} \tag{6}$$

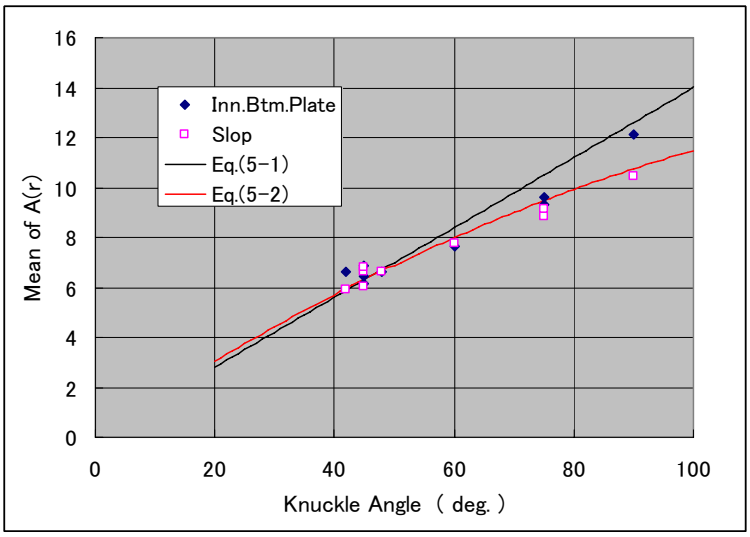


図 2　応力集中係数算式の係数 A

ガイドラインで定義されるホットスポット応力は、板厚程度の細かいSHELL要素によるFE解析を行い、ホットスポット位置から*0.5 t*及び*1.5 t*の位置における応力をホットスポット位置まで直線外挿して評価される。これらの位置におけるFEM解析による評価結果と近似算式による評価結果をまとめて表2に示す。表2から、ナックル点から*0.5 t* 離れた点における近似式による応力は、直線外挿して評価され他応力とほぼ等しいことが分る。以上のことから、ナックル部のホットスポット応力は、応力集中係数を用いる事により以下のように評価される。

$$\sigma_{hot} = K_0 \times \sigma_n \qquad \left[\, K_0 \equiv \frac{A}{r^{\lambda-2}} = \frac{0.14\theta\cdot(1.15 - 0.0033\theta)}{(0.5\cdot t)^{(0.2+0.0028\cdot\theta)}} \,\right] \tag{7}$$

表 2　ホットスポット応力評価結果の比較

θ (deg.)	0.5 t		1.5 t		hot spot		(e) / (b)
	FEM(a)	Formula(b)	FEM(c)	Formula(d)	FEM(e)	Formula(f)	
45	18.6	18.9	14.3	13.2	20.8	21.8	0.9
45	20.6	24.7	16.8	17.6	22.5	28.2	1.1
45	12.4	13.4	9.5	9.4	13.9	15.4	1.0
45	14.4	15.2	11.9	10.6	15.7	17.5	1.0
60	12.0	13.8	9.1	9.2	13.5	16.1	1.0
60	14.6	19.3	12.2	12.9	15.8	22.5	1.2
75	14.0	15.4	10.3	9.8	15.9	18.2	1.0
75	16.8	23.2	13.4	14.8	18.5	27.4	1.3
75	7.9	9.1	5.8	5.8	9.0	10.8	1.0
75	10.2	13.6	8.3	8.7	11.2	16.1	1.2
90	9.7	10.1	7.0	6.2	11.1	12.1	0.9
90	12.1	16.5	9.4	10.0	13.5	19.8	1.2
45	24.2	25.7	19.9	18.0	26.4	29.6	1.0
45	20.7	24.2	17.8	16.9	22.2	27.9	1.1
48	19.6	20.9	15.4	14.5	21.7	24.1	1.0
48	15.9	18.0	13.9	12.5	16.9	20.8	1.1
42	9.9	8.0	7.5	5.6	11.1	9.2	0.7
42	10.7	11.7	8.8	8.3	11.7	13.4	1.0

2. 応力集中係数に対する修正係数

2.1 応力集中に関する影響因子

実際の構造物の構造的な応力集中係数を評価しようとする場合、基本応力集中係数が2次元平面問題の解に基づいているため、修正する必要がある。理想化したモデルと実構造モデルとの違いを考慮すると、以下の修正係数を基本SCF K_0 に考慮する必要がある。

$$K_t = K_0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4$$

K_0　;　対象個所の寸法による係数（(7)式参照）

K_1　;　板の曲げ加工による補正係数

K_2　;　ウエブ増厚による補正係数

K_3　;　水平ガセット或いは縦リブ挿入によるによる補正係数

K_4　;　横リブ挿入による補正係数

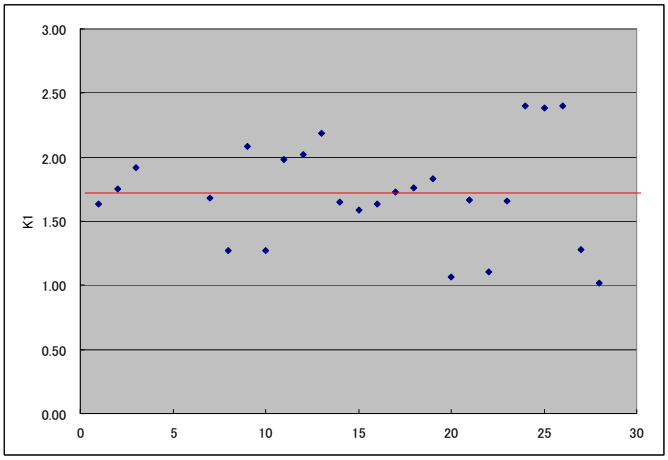
上記の修正係数の値を検討するため、表3に示す構造に対してFE解析を実施し、FE解析の結果を踏まえて修正係数の値を決定した。

表 3　FE 解析ケース

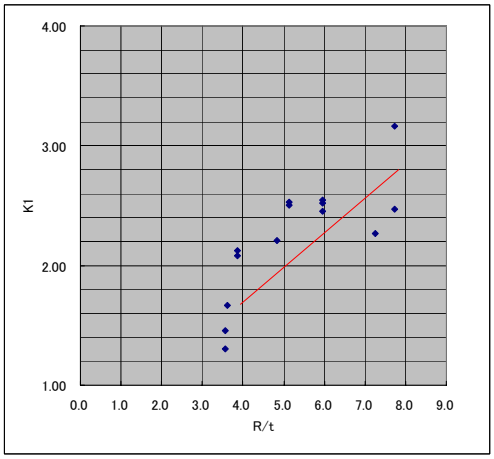
part of structure	knuckle type	longitudinal rib	transverse rib
VLCC Lower knuckle	R=120 - 800	none / attached	none / attached
	weld type	none / attached	none / attached
Bulk Carrier Bilge knuckle	R=60 - 120	none / attached	none / attached
	weld type	none / attached	none / attached
VLCC Upper knuckle	R=120 - 800	none	none
	weld type	none	none

2.1 修正係数

解析結果から逆算した補正係数 K_1 の値について、溶接型及び曲げ加工型について示すと図2のようである。溶接型の K_1 は板厚に依存せずにほぼ一定であるが、曲げ加工型の K_1 は板厚及び曲げ半径に応じて変化する傾向があった。



(1) 溶接型



(2) 曲げ加工型

図 2　解析結果から逆算された補正係数Ｋ１の値

これら結果に基づき、 K_1 の値を以下のように設定することが出来る。

$$K_{1,\,weld} = 1.7$$

$$K_{1,\,bend} = \begin{cases} 1.75 & ; \quad R/t < 4 \\ 0.2625 \cdot R/t + 0.7 & ; \quad 4 \le R/t \le 8 \\ 2.8 & ; \quad 8 < R/t \end{cases}$$

溶接型と曲げ加工型のSCFの大きな違いは、曲げ加工型のナックル部に生じるクロスベンディングによる曲げ応力であり、また、ホットスポット位置が異なることに注意が必要である。曲げ加工型でクロスベンディングを有効に抑制できる場合、曲げ加工型のSCFは溶接型のSCFとほぼ同じとなる。解析結果から、水平ガセット或いは縦リブ挿入によるによる補正係数の、溶接型の平均的な値として $K_3 = 0.9$ を得た。曲げ加工型の K_3 の値は、$K_1 \times K_3$ の値が両タイプで概ね等しくなるように、以下のように決定した。

$$K_{3,\,weld} = 0.9$$

$$K_{1,\,bend} = \begin{cases} 0.85 & ; \quad R/t < 4 \\ 0.15 - 0.075 \cdot R/t & ; \quad 4 \le R/t \le 8 \\ 0.55 & ; \quad 8 < R/t \end{cases}$$

また、解析の結果両タイプ共に、$K_2 = 0.9$及び$K_4 = 0.9$を得た。

3. まとめ

板と板との交差部の幾何形状による応力集中係数は、次式で与えられる。

$$K_t = K_0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4$$

K_0 ; 対象個所の寸法による係数
K_1 ; 板の曲げ加工による補正係数
K_2 ; ウエブ増厚による補正係数
K_3 ; 水平ガセット或いは縦リブ挿入によるによる補正係数
K_4 ; 横リブ挿入による補正係数

表 4　応力集中係数

板厚 (mm)	立ち上り角度 (deg.)			
	40	*45*	*50*	*90*
16	3.0	3.2	3.4	4.2
18	2.9	3.1	3.3	4.0
20	2.8	3.0	3.2	3.8
22	2.7	2.9	3.1	3.6
24	2.6	2.8	3.0	3.5
26	2.6	2.7	2.9	3.4
28	2.5	2.7	2.8	3.3
30	2.4	2.6	2.7	3.2

表 5　修正提案補正係数

	K_1	K_2	K_3	K_4
溶接型	1.7	0.9	0.9	0.9
曲げ加工型	R/t<4 ; 1.75 R/t>8 ; 2.80		R/t<4 ; 0.85 R/t>8 ; 0.55	

1) 曲げ加工型について、4 <R/t < 8 の間のK_1及びK_3は線形補間とする。ここで、R は半径、t は板厚を表す
2) K_2の適用に際し、ウエブの増厚は、内底板の板厚程度の板厚を目安とする。
3) K_1及びK_3の適用に際し、R 部の曲げ変形を有効に抑えるよう効果的に補強材が配置される必要がある。